

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Eletrônica e Microeletrônica

Modelamento Computacional de Ponteiros de Emissão de Campo

Autor: Marcelo Nogueira Tirolli

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Robert Alves

Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação da Universidade Estadual de
Campinas como parte dos requisitos para obtenção
do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Campinas, SP, Brasil

Março de 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

T517m Tirolli, Marcelo Nogueira
Modelamento computacional de ponteiros de emissão de
campo / Marcelo Nogueira Tirolli. --Campinas, SP: [s.n.],
2007.

Orientador: Marco Antonio Robert Alves
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Microeletrônica. 2. Elétrons - Emissão. 3. Campos
elétricos. 4. Medidas elétricas. 5. Simulação
(Computadores). I. Alves, Marco Antonio Robert. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Computational Modeling of field emission tips

Palavras-chave em Inglês: Vacuum microelectronics, Electrons – emission, Electric field,
Electrical characterization, Simulation (computers), Field
emission tips, Emission current, Field enhancement factor

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Ricardo da Silva Braga, Douglas de Freitas Takeuti e Edmundo da
Silva Braga

Data da defesa: 14/03/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Eletrônica e Microeletrônica

Modelamento Computacional de Ponteiras de Emissão de Campo

Autor: Marcelo Nogueira Tirolli

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Robert Alves

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marco Antonio Robert Alves
FEEC / UNICAMP

Prof. Dr. Ricardo da Silva Braga
Faculdade de Engenharia Elétrica / PUC Campinas; Pesquisador Colaborador / UNICAMP

Prof. Dr. Douglas de Freitas Takeuti
Escola Americana de Campinas

Prof. Dr. Edmundo da Silva Braga
FEEC / UNICAMP

Campinas, SP, Brasil

Março de 2007

Resumo

Este trabalho tem como objetivo o estudo do comportamento elétrico de uma ponteira de emissão de campo, modelada na forma de um hemisfério sobre um poste, através de recursos computacionais (simulações). Escolhemos o software comercial Ansys, que utiliza o método dos elementos finitos nas análises dos fenômenos físicos para obtenção do campo elétrico na superfície da ponteira. Em seguida, foi desenvolvido também um programa computacional que realiza o cálculo da corrente de emissão baseado na teoria de emissão de campo de Fowler-Nordheim (F-N). Para calcular a corrente, o programa faz uso dos resultados das simulações do campo elétrico obtidos no software Ansys. Apresentamos também os resultados da influência que as dimensões como o raio de curvatura do hemisfério, a altura da ponteira e a distância entre anodo e catodo exercem sobre o comportamento do campo elétrico, da corrente de emissão e de outras grandezas físicas que envolvem emissão de campo.

Abstract

This work aims to study the electrical behavior of a field emission tip, shaped in the form hemisphere on a post, through computational resources (simulations). We chose the Ansys commercial software that uses the finite element methods in the analyses of the physical phenomena to obtain the electric field in the surface of the tip. After that, a computational program was also developed to perform the calculation of emission current based on Fowler-Nordheim (F-N) field emission theory. To calculate the current, the program uses the results of the electric field simulations gotten in Ansys software. We also show the results of influences that dimensions such as the hemisphere curvature radius, the height of the tip and the distance between anode and cathode exert on the behavior of the electric field, emission current and other physical quantities that involve field emission.

Dedico este trabalho aos meus pais

Dorival Tirolli
e
Edy Nogueira Tirolli

que sempre me apoiaram e incentivaram
durante estes dois anos.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marco Antonio Robert Alves pela oportunidade e orientação oferecida.

Ao Prof. Dr. Edmundo da Silva Braga pela oportunidade oferecida e pelo apoio prestado durante as atividades deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Ricardo da Silva Braga pela ajuda oferecida para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. Douglas de Freitas Takeuti pelo apoio prestado durante o desenvolvimento dos trabalhos.

A minha irmã Daniela pelo apoio e incentivo dado.

Aos colegas do laboratório Lésnir e Carlos pela cooperação e convívio.

Ao CNPq e à FAPESP pelo apoio financeiro, e a UNICAMP pelo apoio institucional.

A todos aqueles que participaram deste trabalho e que foram involuntariamente omitidos.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Ponteiras de Emissão de Campo a Vácuo	6
1.2	Aplicações Envolvendo as Ponteiras de Emissão de Campo a Vácuo	8
1.2.1	Display de Tela Plana de Emissão de Campo	8
1.2.2	Elementos Ativos	10
1.2.3	Sensor de Pressão	12
1.2.4	Sensor Magnético	13
1.3	Objetivo do Trabalho	14
2	Teoria de Emissão de Campo	15
2.1	Teoria de Fowler-Nordheim	15
2.2	Enriquecimento de Campo	22
2.3	Modelos Geométricos de Pontas de Emissão de Campo	24
2.3.1	Modelo Usado no Trabalho – Hemisfério sobre um Poste	27
3	Procedimento Utilizado para a Simulação de uma Ponteira de Emissão de Campo	29
3.1	Método dos Elementos Finitos	29
3.1.1	Características de um Software Baseado no FEM	34
3.2	Cálculo do Campo Elétrico Utilizando-se o Software Ansys	34
3.2.1	Pré-Processamento	36
3.2.2	Processamento e Pós-Processamento	43
3.3	Cálculo da Corrente de Emissão	45
4	Apresentação e Discussão dos Resultados	47
4.1	Curva Característica Corrente x Tensão (I x V) e Curva de Fowler-Nordheim (F-N)	48
4.2	Influência da Função Trabalho na Curva Característica Corrente x Tensão (I x V)	52

4.3	Dependência da Corrente de Emissão e do Campo Elétrico em Função do Raio de Curvatura da Ponteira	53
4.4	Dependência da Densidade de Corrente e do Campo Elétrico em Função do Ângulo do Hemisfério	54
4.5	Dependência da Tensão de Limiar em Função da Distância entre Anodo e o Topo da Ponteira	56
4.6	Fator de Enriquecimento de Campo em Função da Distância entre Anodo e Catodo	58
4.7	Determinação do Fator de Enriquecimento de Campo em Função da razão h/r	60
5	Conclusões e Perspectivas para o Futuro	64
5.1	Conclusões	64
5.2	Perspectivas para o Futuro	65
	Referências Bibliográficas	66
	Trabalhos Publicados pelo Autor	70

Capítulo 1

Introdução

Quando o transistor foi inventado por Bardeen, Brattain e Shockley no final da década de 1940 [1] e, em seguida, com o desenvolvimento dos circuitos integrados (CI's) utilizando-se o processo planar [2], inúmeras pessoas achavam que os tempos de uso dos tubos a vácuo estavam acabando. Isto ocorrera decorrente do fato dos tubos a vácuo serem considerados grandes, frágeis e ineficientes, além de precisarem de um ambiente de vácuo para operar e um catodo quente (com temperatura em torno de 1000° C) para gerar os elétrons.

Com o surgimento da microeletrônica a vácuo, no entanto, novos interesses estão se voltando para o desenvolvimento e a aplicação de diversos dispositivos envolvendo vácuo, como displays de tela plana de alta definição, sensor de pressão, sensor de campo magnético, gerador e amplificador de microondas, microscopia eletrônica, litografia por feixe de elétrons [3,4], entre outros.

A microeletrônica a vácuo vem sendo desenvolvida nas últimas décadas e é considerada um novo campo na área da micro e nanoeletrônica. Seu princípio de funcionamento está baseado em empregar elétrons no vácuo (efeito de tunelamento) através de dispositivos com forma piramidal ou cônica e com dimensões micro e nanométricas (também chamados de catodos frios). Estes dispositivos podem ser fabricados, utilizando-se as técnicas de microfabricação desenvolvidas na indústria de semicondutores como, por exemplo, oxidação térmica, fotolitografia, deposição de filmes por CVD (chemical vapor depositions), corrosão por plasma, etc.

Os fatores que impulsionaram o desenvolvimento da microeletrônica a vácuo foram algumas vantagens que ela apresenta em relação à microeletrônica do estado sólido, como [4]:

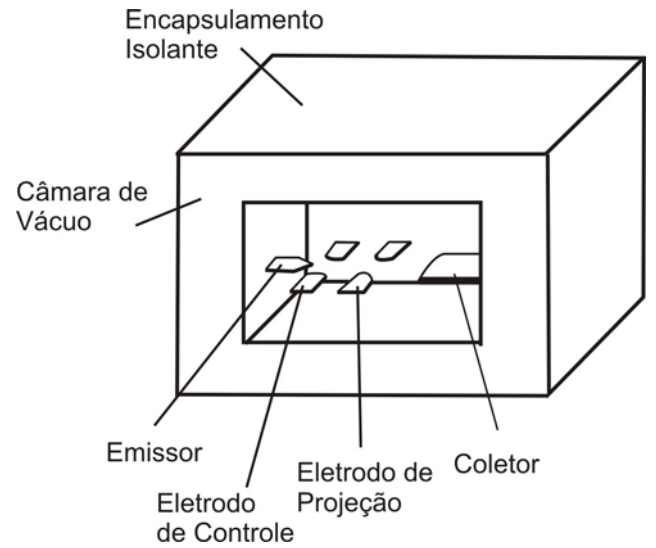
- tolerância a efeitos de temperatura;
- tolerância a altas radiações;
- não há dissipação de energia durante o transporte do elétron no meio (que é o vácuo);
- não linearidade acentuada da curva característica corrente-tensão.

Os estudos e o desenvolvimento de dispositivos envolvendo a microeletrônica a vácuo, como display de tela plana, têm atraído a atenção de diversos centros de pesquisa e indústrias, como Sony, Motorola, Canon, Futaba, Samsung, Hitachi [5,6], entre outras. A seguir será apresentado um resumo do início até os tempos atuais dos principais acontecimentos envolvendo a microeletrônica a vácuo.

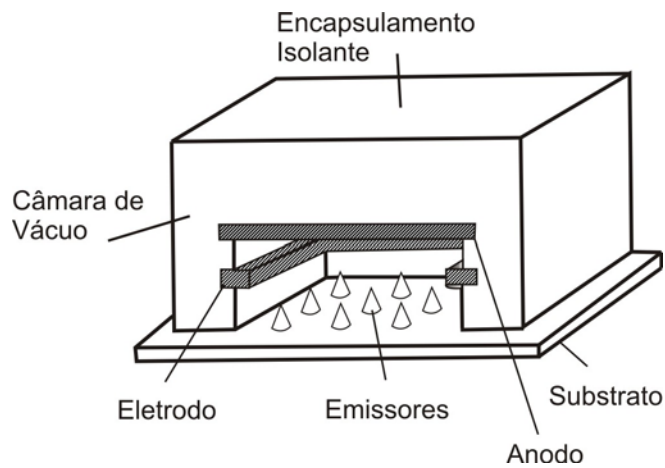
Em 1961, Shoulders do Stanford Research Institute (SRI) publicou um artigo com o título “Microelectronics using electron-beam-activated machining techniques” [7], no qual propôs conceber um dispositivo de efeito de tunelamento a vácuo de dimensões micrométricas, com tempo de chaveamento da ordem de 10^{-10} s e que também apresentasse as seguintes características:

- (I) tensão de operação da ordem de 50 V;
- (II) possuir entrada com alta impedância;
- (III) ser insensível a efeitos de temperatura até 1000° C;
- (IV) ser insensível a efeitos de radiação ionizante;
- (V) tempo de vida estimado para centenas de anos.

Shoulders também propôs as estruturas básicas que compõem, atualmente, a microeletrônica a vácuo. As Figuras 1.1a e 1.1b mostram as duas estruturas propostas.



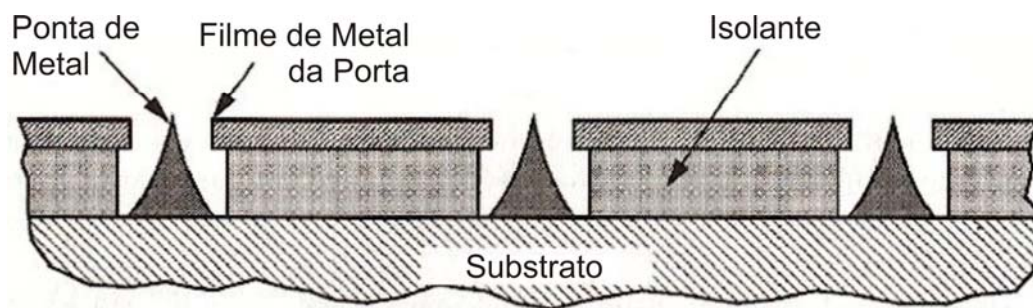
(a)



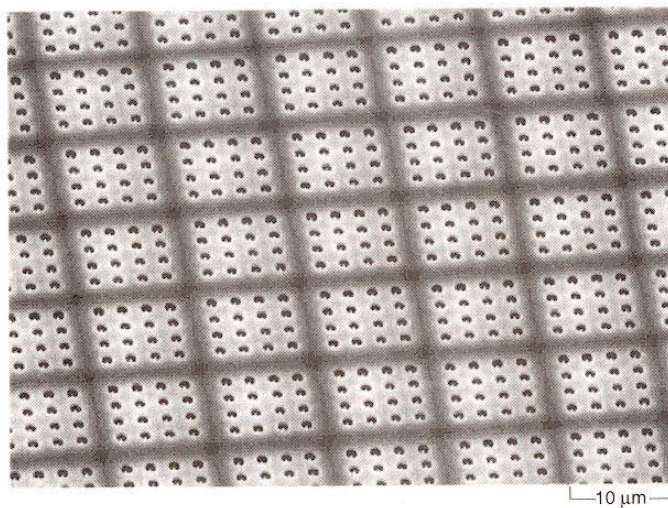
(b)

Fig. 1.1 – Estruturas propostas por Shoulders [8]. (a) Tetrodo lateral; (b) triodo vertical.

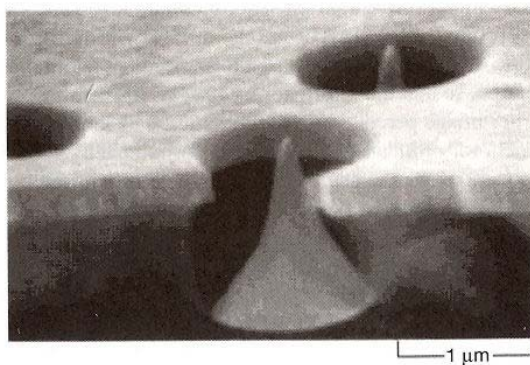
Spindt, também do SRI, desenvolveu o método de fabricação de dispositivos similares à Figura 1.1b, com exceção de que cada emissor era envolvido pelo eletrodo de porta. A primeira publicação deste trabalho ocorreu em 1968 [9], na qual os emissores, conhecidos hoje como catodo de Spindt, eram constituídos por uma estrutura multicamada, composta de eletrodo de porta de molibdênio (Mo) / isolante de dióxido de silício (SiO_2) / catodos em forma de cones de Mo sobre um substrato, fabricados pela técnica de deposição de filmes finos. As Figuras 1.2a, 1.2b e 1.2c mostram o catodo de Spindt.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1.2 – Catodo de Spindt [4]. (a) Esquema representativo; (b) imagem de microscópio eletrônico de varredura (SEM) de um arranjo (array); (c) SEM de uma ponta em um arranjo.

O catodo de Spindt também é referenciado na literatura como FEA's (field emitter arrays), considerando que são constituídos por um arranjo composto por um grande número de pontas emissoras (com densidade acima de 10^6 cm^{-2}) e com distância micro ou nanométrica entre um emissor e outro.

Em 1974, Thomas publicou um trabalho [10] demonstrando um FEA com emissores constituídos de silício e sem o eletrodo de porta (gate).

Em 1985, o grupo Francês LETI, liderado por Robert Meyer, apresentou um trabalho [3] mostrando os resultados preliminares de um display de tela plana baseado no catodo de Spindt, conhecido também como display de emissão de campo (FED – Field Emitter Display).

Em 1986, Gray publicou um trabalho [11] de uma estrutura chamada “transistor de efeito de campo a vácuo”, baseado em FEA's de silício. A estrutura era composta por emissores, portas e coletores no mesmo plano. A Figura 1.3 mostra o esquema do transistor de efeito de campo a vácuo.

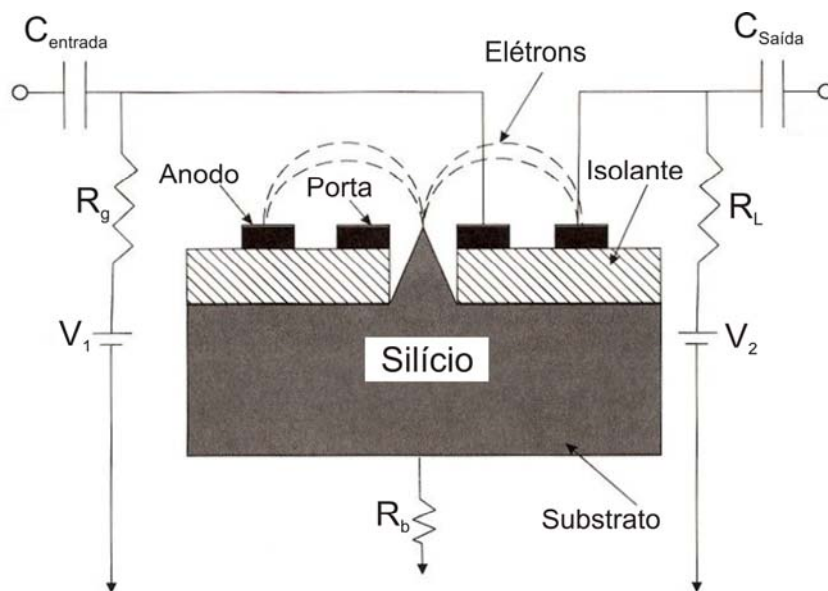


Fig. 1.3 – Esquema de um transistor de efeito de campo a vácuo [4,11].

Em 1987, Holand, outro pesquisador do SRI, demonstrou um FED colorido de alta resolução e com os FEA's endereçados individualmente [3].

Com o grande interesse mundial em FEA's e em suas aplicações, pensou-se na formação de um fórum internacional para que os pesquisadores da área de microeletrônica a vácuo pudessem se reunir e trocar informações. Em 1988, Gray e Spindt organizaram a primeira conferência internacional de microeletrônica a vácuo (IVMC – International Vacuum Microelectronics Conference) em Williamsburg, Virginia.

Desde então, IVMC's (a partir de 2004, passou a se chamar IVNC – International Vacuum Nanoelectronics Conference) vêm sendo realizados anualmente em diversos lugares, cobrindo assuntos da área como teoria de emissão de campo, modelamento e simulação de dispositivos, processos de fabricação, FED's, novos materiais, etc.

1.1 – Ponteiras de Emissão de Campo a Vácuo

As ponteiras de emissão de campo a vácuo são constituídas por um arranjo de pontas (FEA) com dimensões micro e ou nanométricas. Elas podem ser fabricadas através de diversos materiais, como molibdênio (Mo), tântalo (Ta), silício (Si), arseneto de gálio (GaAs), tungstênio (W), etc., além de técnicas de processo de fabricação como corrosão, deposição por bombardeamento iônico em um alvo (sputtering), deposição por feixe de elétrons (e-beam), etc. [8]. A Figura 1.4 mostra o esquema das ponteiras na configuração diodo.

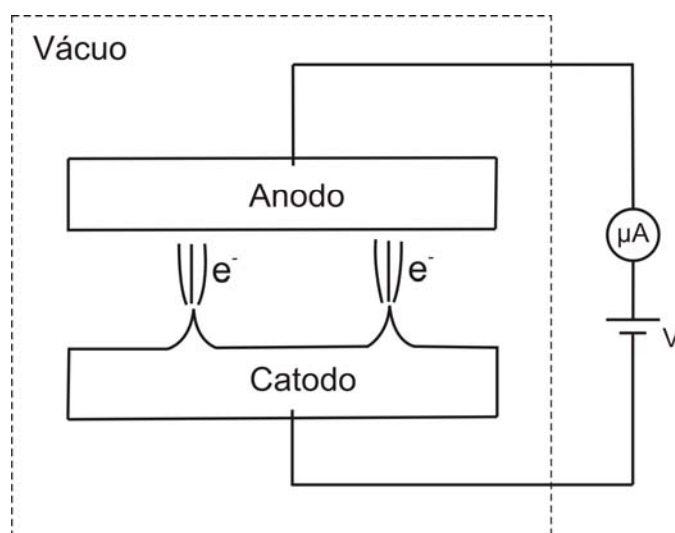


Fig. 1.4 - Esquema das ponteiras na configuração diodo.

Nesta configuração, através da fonte de tensão V , uma diferença de potencial é aplicada entre o eletrodo superior (anodo) e as pontei­ras (catodo), criando assim um campo elétrico na superfície das pontei­ras. Quando o campo elétrico atinge uma grandeza da ordem de 10^7 V/cm [8,12], as pontei­ras emitem elétrons (e^-) para o vácuo que, em seguida, são coletados pelo anodo, cuja corrente elétrica é medida pelo microamperímetro (μA).

As pontei­ras também podem ser utilizadas na configuração triodo, em que um terminal de porta (gate) envolve cada pontei­ra do FEA. A Figura 1.5 mostra o esquema das pontei­ras na configuração triodo.

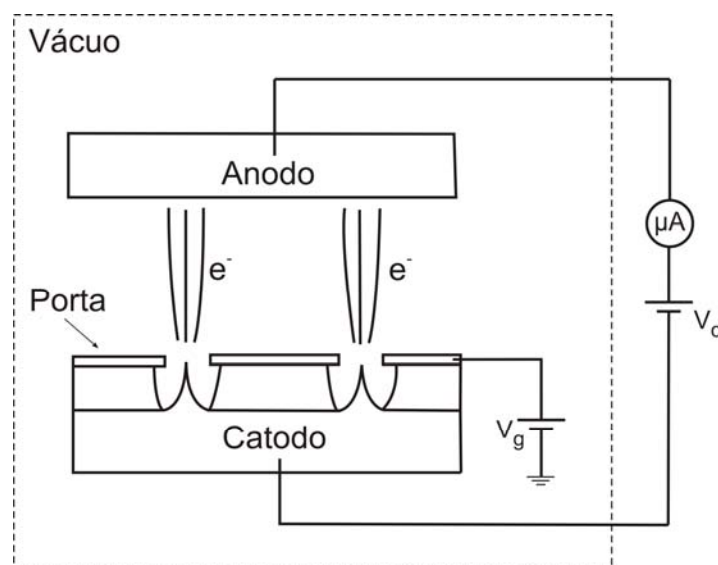


Fig. 1.5 - Esquema das pontei­ras na configuração triodo.

Na configuração triodo, além da diferença de potencial entre anodo e catodo (como na configuração diodo), também é aplicada uma tensão no eletrodo de porta (V_g), que passa a ser o principal responsável pela indução do campo elétrico na superfície das pontei­ras. Sob a ação do campo elétrico, as pontei­ras emitem os elétrons (e^-), sendo praticamente todos coletados pelo anodo, que está sob um potencial elétrico (V_c) maior que o da porta. Com isso, a corrente elétrica na porta é praticamente nula. Uma vantagem da configuração triodo, em relação a diodo, é a redução da tensão de operação do dispositivo, devido à menor distância entre as pontei­ras e o terminal de porta.

Algumas novas estruturas que vem sendo desenvolvidas recentemente, como nanotubos e nanofios, podem ser incorporadas às ponteiros de emissão de campo [13-16], com o objetivo, entre outros, de diminuir a tensão de operação do dispositivo. A Figura 1.6 mostra o esquema de nanotubos de carbono (CNT's – carbon nanotubes) crescidos na superfície da ponteira.

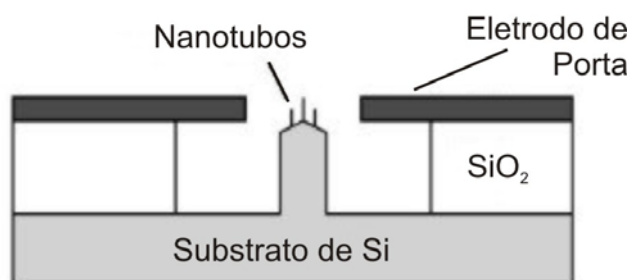


Fig. 1.6 - Esquema de nanotubos crescidos na superfície da ponteira [14].

1.2 – Aplicações Envolvendo as Ponteiros de Emissão de Campo a Vácuo

1.2.1 – Display de Tela Plana de Emissão de Campo

O display de emissão de campo (FED) foi uma das principais aplicações para o avanço da microeletrônica a vácuo. Sua tecnologia foi proposta primeiramente por Crost, Shoulders e Zinn em 1970 [4].

O princípio de operação do FED é similar aos tubos de raios catódicos (CRT's – cathode ray tubes) no sentido de que os elétrons são gerados para colidir sobre uma tela de fósforo, resultando em uma luz emitida no ponto de impacto. As principais diferenças entre FED e CRT são a forma como os elétrons são gerados e como eles chegam na tela de fósforo.

No CRT, os elétrons são gerados por emissão termiônica, na qual são emitidos por um feixe em CRT monocromático ou por três feixes em CRT colorido. Já no FED, os elétrons são gerados a partir da aplicação de um intenso campo elétrico no catodo (por

exemplo, ponteiros de silício e ou nanotubos de carbono), resultando em diversos feixes de elétrons, tanto para FED monocromático como colorido.

A outra diferença é que, no CRT, os feixes de elétrons fazem uma varredura na tela para a formação da imagem. Já no FED, não é necessário fazer a varredura dos feixes de elétrons, sendo que cada pixel na tela é formado por um arranjo de emissores de elétrons. A Figura 1.7 mostra o princípio de funcionamento de um FED.

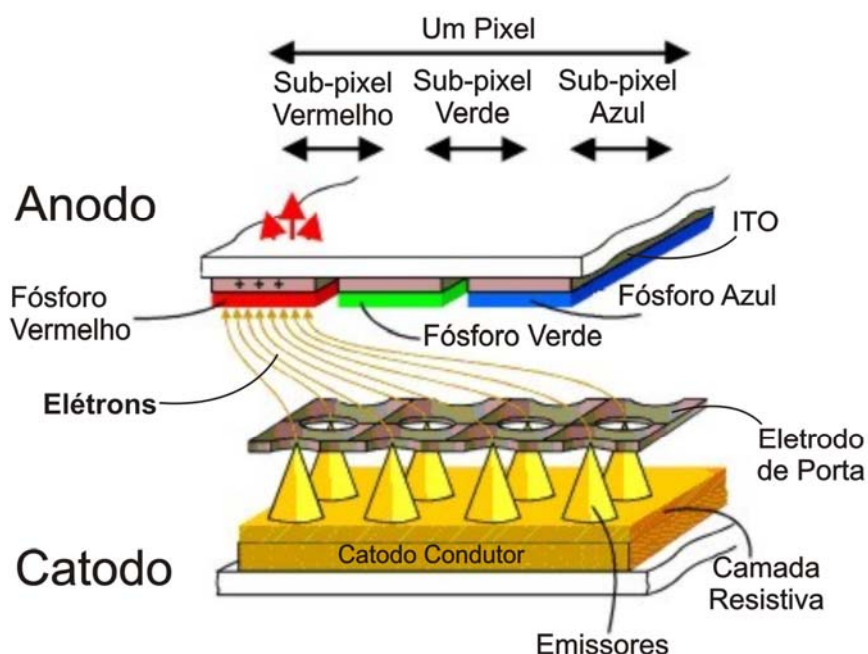


Fig. 1.7 - Princípio de funcionamento de um FED.

As principais vantagens do FED sobre outras tecnologias de tela plana são: maior brilho, melhor ângulo de visão, menor consumo de energia e operação em altas temperaturas.

Diversos centros de pesquisas e empresas da área de eletroeletrônicos vêm trabalhando para o desenvolvimento e aperfeiçoamento dos FED's, podendo ser uma das alternativas para a próxima geração de displays de tela plana. As Figuras 1.8a, 1.8b, 1.8c e 1.8d mostram alguns FED's já desenvolvidos.



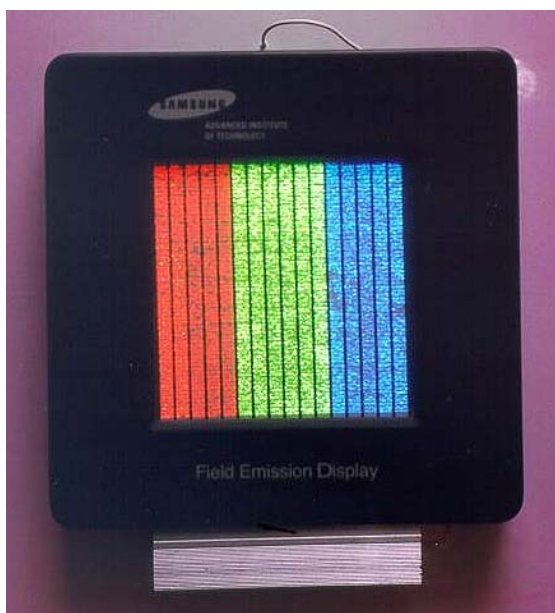
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1.8 – FED's já desenvolvidos por algumas empresas. (a) Futuba; (b) Motorola; (c) PixTech; (d) Samsung.

1.2.2 – Elementos Ativos

Elementos ativos, como transistores, podem ser implementados, integrando emissores de campo (FEA's) de silício com transistores de efeito de campo metal-óxido-

semicondutor (MOSFET – metal-oxide-semiconductor field effect transistor). A Figura 1.9 mostra o esquema de um emissor de campo integrado a um MOSFET (FEA-MOSFET) e o respectivo circuito.

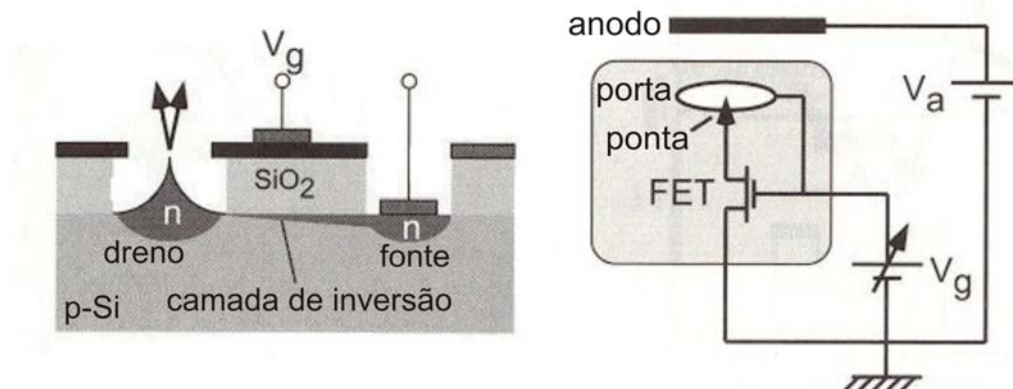


Fig. 1.9 – Esquema de um FEA-MOSFET e o respectivo circuito [3].

Uma ponta emissora é fabricada como sendo o dreno da estrutura do MOSFET. O terminal de porta do MOSFET, além de controlar a corrente fornecida da fonte para a ponteira (dreno) através da camada de inversão no substrato do semicondutor, serve também como eletrodo de porta para a ponteira.

Estruturas FEA-MOSFET também podem ser implementadas para realizar funções lógicas como E, NE, NOU [3,17]. A Figura 1.10 mostra um esquema de um FEA-MOSFET e o respectivo circuito de uma função lógica E. A ponteira emitirá elétrons apenas quando V_g , V_x e V_y estiverem com um sinal positivo.

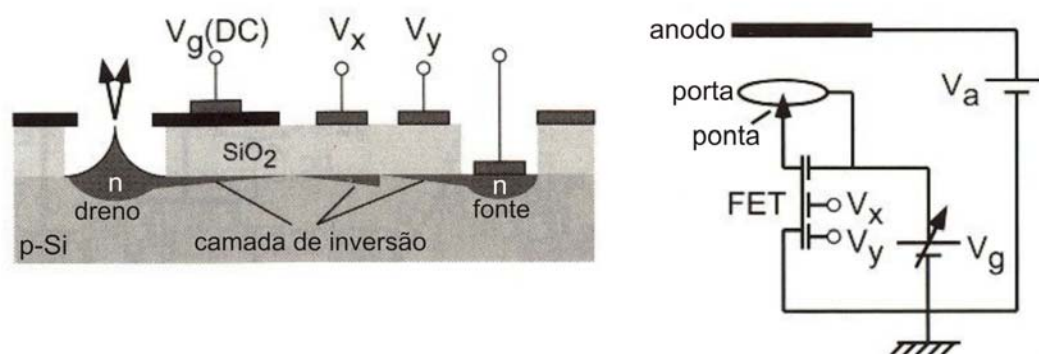


Fig. 1.10 – Esquema de um FEA-MOSFET com três terminais de porta (função lógica E) e o respectivo circuito [3].

1.2.3 – Sensor de Pressão

As ponteiros de emissão de campo a vácuo também podem ser utilizadas em aplicações para sensores de pressão [8,18]. As Figuras 1.11a e 1.11b mostram os esquemas de sensores de pressão implementados nas configurações diodo e triodo, respectivamente.

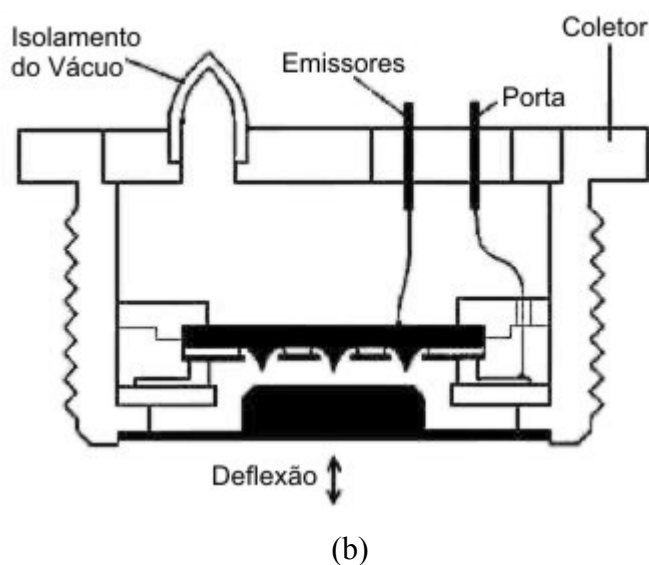
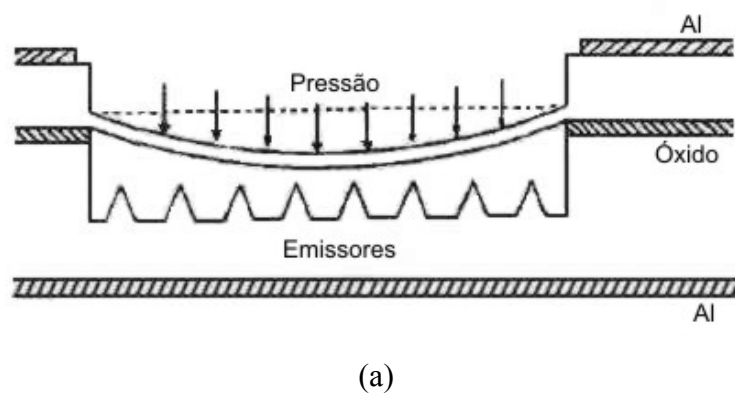


Fig. 1.11 – Esquema de sensor de pressão a vácuo [8]. (a) Configuração diodo; (b) configuração triodo.

Em ambas as configurações, sobre a influência de uma pressão, altera-se a distância entre anodo e catodo (emissores) e, conseqüentemente, a intensidade do campo elétrico na

superfície dos emissores. Considerando a corrente elétrica altamente dependente do campo elétrico, a alteração deste último resulta em uma alteração na corrente elétrica.

1.2.4 – Sensor Magnético

Outra aplicação para as ponteiros de emissão de campo a vácuo é em sensores magnéticos. O primeiro trabalho demonstrando esta aplicação foi feito por Sugiyama [19]. O sensor magnético a vácuo é constituído por uma ponta emissora de silício na forma cônica, envolvida pelo eletrodo de porta e um anodo dividido em duas partes iguais. A Figura 1.12 mostra o esquema de um sensor magnético a vácuo.

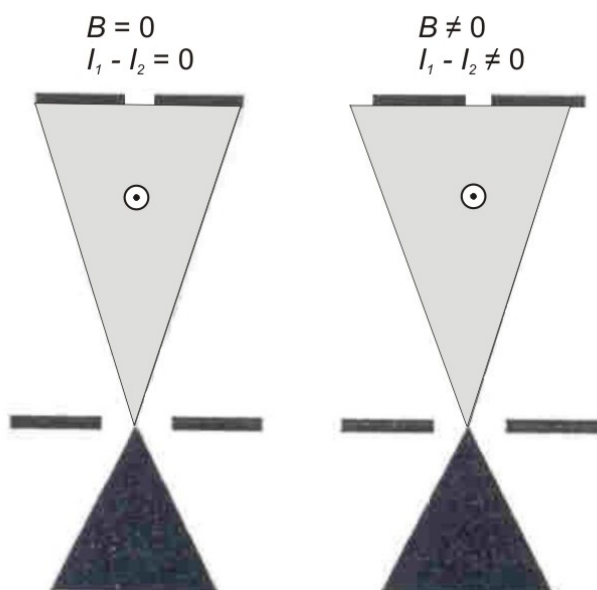


Fig. 1.12 – Esquema de um sensor magnético a vácuo [4].

A ponta é posicionada exatamente no centro entre as duas partes do anodo. Na ausência de campo magnético, a densidade de corrente elétrica é igual nas duas partes. Ao aplicar um campo magnético, aparecerá uma diferença na corrente entre as duas partes do anodo, como mostrado na Figura 1.12.

1.3 – Objetivo do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento de uma ponteira de emissão de campo, modelada no formato de um hemisfério sobre um poste, na configuração diodo, utilizando-se recursos computacionais (simulações). Este modelo vem sendo utilizado em estudos não somente para representar as ponteiras, mas também outros dispositivos de emissão de campo, como nanotubos de carbono e nanofios.

Para o estudo do comportamento do campo elétrico na superfície da ponteira, optou-se em utilizar o software comercial Ansys, que utiliza o método dos elementos finitos nas análises dos fenômenos físicos. Já para o estudo da corrente de emissão, foi utilizado um programa desenvolvido junto com o Prof. Dr. Ricardo da Silva Braga, que, baseado nos resultados do campo elétrico, na teoria de emissão de campo formulada por Fowler-Nordheim (F-N) e na área de emissão da ponteira, efetua o cálculo da corrente de emissão.

Também será verificada a influência que algumas dimensões geométricas, como raio de curvatura do hemisfério, altura da ponteira e distância entre anodo e catodo, exercem sobre o comportamento da ponteira, em especial no campo elétrico e na corrente de emissão. A partir dos resultados, outras grandezas físicas que envolvem a emissão de campo podem ser calculadas, como, por exemplo, o fator de enriquecimento de campo.

Capítulo 2

Teoria de Emissão de Campo

Neste capítulo, apresentaremos a teoria de emissão de campo, que consiste no efeito de tunelamento de elétrons de um metal para o vácuo. A teoria está baseada no modelo de emissão de campo de Fowler-Nordheim e, conseqüentemente, nas características elétricas relacionadas às pontei­ras, como corrente de emissão, tensão entre anodo e catodo, campo elétrico na superfície da ponta, fator de enriquecimento de campo, fator de conversão de campo e função trabalho. Também serão apresentados alguns modelos geométricos e suas características com relação à emissão de campo, dando uma maior atenção para o modelo geométrico hemisfério sobre um poste, que foi o modelo usado neste trabalho.

2.1 – Teoria de Fowler-Nordheim

A teoria de emissão de campo foi originalmente formulada por Fowler-Nordheim em 1928 [20] e descreve o tunelamento de elétrons através de uma barreira de potencial modificada pela aplicação de um campo elétrico externo intenso, como mostra o esquema representativo da Figura 2.1.

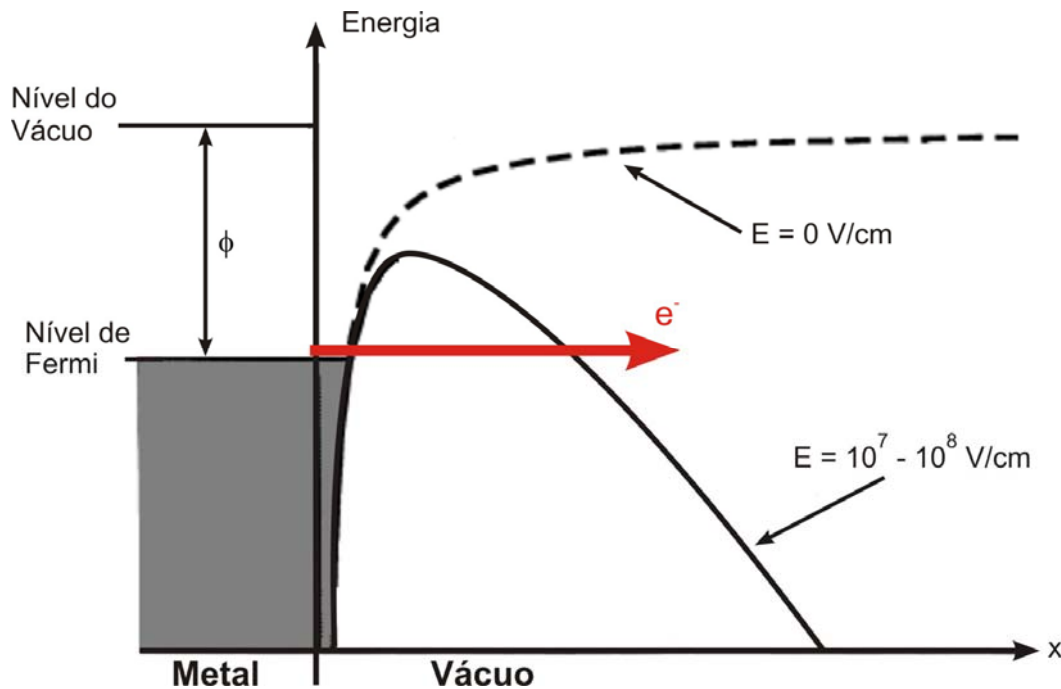


Fig. 2.1 – Esquema representativo do mecanismo de tunelamento de elétrons através de uma barreira de potencial.

A linha pontilhada representa a barreira sem a aplicação do campo elétrico externo ($E = 0$ V/cm), na qual o tunelamento de elétrons é desprezível. A altura da barreira equivale à função trabalho ϕ do metal, e é definida como sendo a mínima energia necessária para remover um elétron do nível de Fermi para fora da superfície do metal. Já a linha sólida representa a barreira com a presença do campo elétrico externo ($E = 10^7 - 10^8$ V/cm), resultando em uma diminuição na largura da barreira e, conseqüentemente, aumentando a probabilidade de tunelamento dos elétrons. Para produzir estes intensos campos elétricos com a aplicação de potenciais moderados, os emissores normalmente apresentam formas piramidais ou cônicas e com raio de curvatura da ponta variando de algumas dezenas de ângstrons até algumas centenas de microns.

A teoria de Fowler-Nordheim (F-N) é baseada nas seguintes condições [4,21]:

- o metal obedece ao modelo do elétron livre de Sommerfeld, com as estatísticas de Fermi-Dirac;
- os cálculos apresentados são para a temperatura $T = 0$ K;

- a superfície do metal é plana para o problema ser considerado de uma dimensão. Esta condição se faz necessária, porque, na maioria dos casos, a espessura da barreira de potencial com campos da ordem de $10^7 - 10^8$ V/cm é várias ordens de grandeza menor do que os raios de curvatura dos emissores. Desta forma, o campo elétrico externo pode ser considerado uniforme ao longo da superfície;
- a altura da barreira dentro do metal é constante (função trabalho ϕ do metal);
- a força em um elétron do lado de fora da superfície do catodo (emissores) é a soma da carga induzida na superfície (por exemplo, a força imagem) com o campo elétrico externo aplicado.

A força imagem F em um elétron de carga elementar $-e$, a uma distância x de um plano condutivo é dada por

$$F = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0(2x)^2} \quad (2.1)$$

onde ϵ_0 é a permissividade do vácuo.

A força F age em uma direção, de forma a atrair o elétron para a superfície. Se um campo elétrico externo E é aplicado na direção oposta, a força total resultante é

$$F = Ee - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0(2x)^2} \quad (2.2)$$

A presença do campo elétrico externo E não altera os estados do elétron dentro do metal. A Figura 2.2 mostra a barreira de potencial resultante da força imagem F e do campo elétrico externo E em função da distância x .

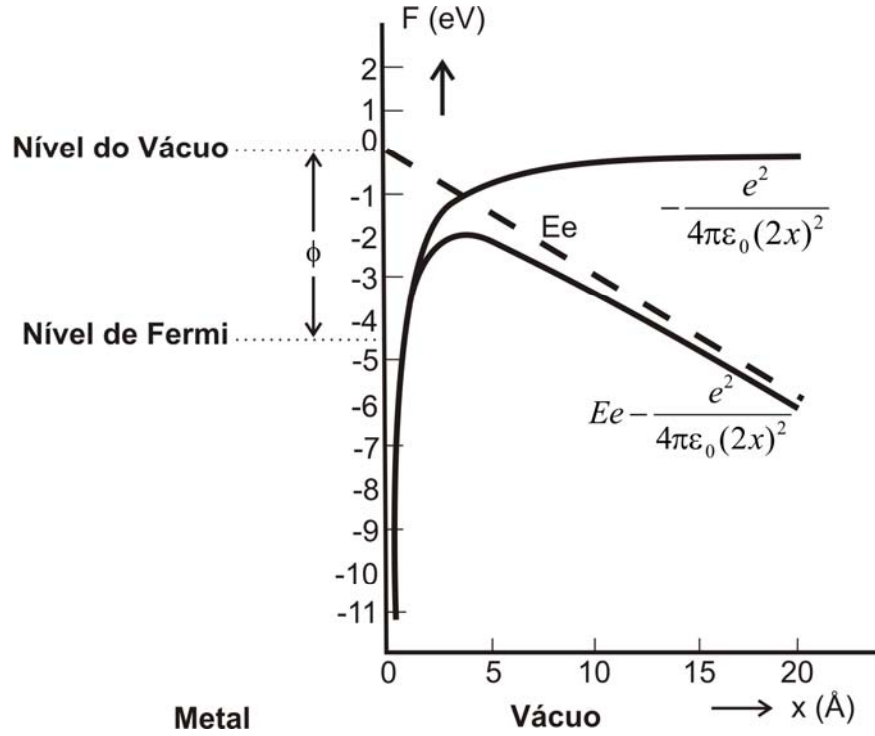


Fig. 2.2 – Esquema representativo da barreira de potencial. Adaptada de [4].

Se a energia associada com a componente velocidade de um elétron movendo-se na direção perpendicular à superfície é designada como sendo ξ , então a corrente de uma unidade de área na superfície é

$$J = e \int_{-\infty}^{\infty} N(\xi) D(E, \xi, \phi) d\xi \quad (2.3)$$

onde $N(\xi)d\xi$ é o número de elétrons incidentes sob a superfície por unidade de área por segundo, com energia associada com a velocidade perpendicular à superfície de ξ até $\xi + d\xi$; $N(\xi)$ é chamado de função da densidade de elétrons; $D(E, \xi, \phi)$ é a probabilidade de um elétron com energia cinética ξ ser transmitido por uma barreira de função trabalho ϕ , associada com o campo elétrico externo E ; $D(E, \xi, \phi)$ é chamado de função de transmissão ou função de transparência.

Em seguida, será apresentada a expressão com o resultado final da integral da Equação (2.3), conhecida também como fórmula da densidade de corrente de Fowler-Nordheim (F-N). Maiores detalhes da solução da integral da Equação (2.3) e do desenvolvimento de suas componentes podem ser encontrados nas referências [4,21].

$$J = \frac{e^3}{8\pi h} \frac{E^2}{t^2(y)\phi} \exp \left[-\frac{8\pi(2m)^{1/2} \cdot \phi^{3/2} \cdot v(y)}{3heE} \right] \quad (2.4)$$

onde h é a constante de Planck e m é a massa do elétron.

Substituindo as constantes (e, h, m) na Equação (2.4), obtemos

$$J = \frac{1,54 \times 10^{-6} \cdot E^2}{t^2(y) \cdot \phi} \exp \left[\frac{-6,83 \times 10^7 \cdot \phi^{3/2} \cdot v(y)}{E} \right] \quad (2.5)$$

onde J é a densidade de corrente em A/cm², E é o campo elétrico na superfície da ponta em V/cm, ϕ é a função trabalho do metal em eV, e $t(y)$ e $v(y)$ são funções elípticas de Nordheim.

As funções $t(y)$ e $v(y)$ são tabeladas e podem ser encontradas em algumas publicações [22,23]. Ambas estão em função do parâmetro y , que está relacionado com o campo elétrico E e a função trabalho ϕ da seguinte forma:

$$y = \frac{3,79 \times 10^{-4} \cdot E^{1/2}}{\phi} \quad (2.6)$$

A função $t(y)$ varia muito pouco em relação a y , e, na maioria dos casos, seu valor é estabelecido próximo do valor unitário ($t^2(y) \approx 1,1$). Já a função $v(y)$ apresenta uma variação significativa em relação a y e normalmente costuma ser estabelecida com a seguinte expressão:

$$v(y) = 0,95 - y^2 \quad (2.7)$$

A Figura 2.3 mostra a variação das funções $t^2(y)$ e $v(y)$ em função de y , e compara os valores exatos com os valores aproximados citados anteriormente de ambas as funções.

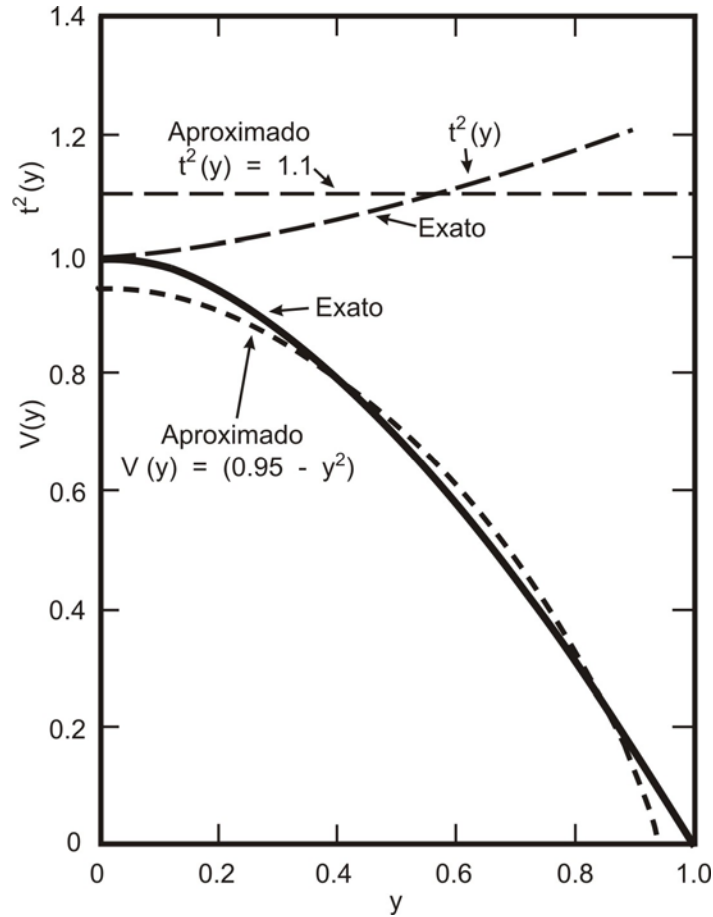


Fig. 2.3 – Curvas das variações exatas e aproximadas das funções $t^2(y)$ e $v(y)$ em função de y [23].

Com as deduções de $t^2(y)$ e $v(y)$, a Equação (2.5) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$J = 1,4 \times 10^{-6} \frac{E^2}{\phi} \exp \left(-6,53 \times 10^7 \frac{\phi^{3/2}}{E} \right) \exp \left(\frac{9,87}{\phi^{1/2}} \right) \quad (2.8)$$

Quando uma diferença de potencial V é aplicada entre anodo e catodo (ponta), o campo elétrico E na superfície da ponta é

$$E = \beta V \quad (2.9)$$

onde β é o fator de conversão de campo.

Se a área onde ocorre a emissão dos elétrons for definida como α e substituindo a Equação (2.9) na Equação (2.8), chega-se à seguinte expressão para a corrente elétrica:

$$I = J \times \alpha = A \times V^2 \exp\left(\frac{-B}{V}\right) \quad (2.10)$$

onde

$$A = \frac{1,4 \times 10^{-6} \times \alpha \times \beta^2}{\phi} \exp\left(\frac{9,87}{\phi^{1/2}}\right) \quad (2.11)$$

e

$$B = \frac{6,53 \times 10^7 \times \phi^{3/2}}{\beta} \quad (2.12)$$

Nas Equações (2.11) e (2.12), as unidades das variáveis são: α em cm^2 , β em cm^{-1} e ϕ em eV.

Aplicando logaritmo neperiano na Equação (2.10), temos

$$\ln\left(\frac{I}{V^2}\right) = \ln A - B\left(\frac{1}{V}\right) \quad (2.13)$$

Normalmente, os dados da caracterização elétrica das ponteiros de emissão de campo são a corrente de emissão I em função da tensão V . Se plotarmos um gráfico na forma de $\ln(I/V^2)$ em função de $(1/V)$, chegaremos a uma reta com inclinação negativa e

proporcional a B . Este gráfico também é conhecido como gráfico de Fowler-Nordheim (F-N).

Quando a função trabalho ϕ do material da ponta é conhecida e com o gráfico de F-N, é possível obter informações referentes ao fator de conversão de campo β e a área de emissão α . Sendo a inclinação (coeficiente angular) da reta do gráfico de F-N proporcional a B , através da Equação (2.12) é possível estimar o β . Como a interseção da reta no eixo $\ln(I/V^2)$ é proporcional a A , através da Equação (2.11) pode-se estimar a área de emissão α . Com o resultado do fator de conversão de campo β , é possível estimar o campo elétrico E através da Equação (2.9).

2.2 – Enriquecimento de Campo

Em configurações semelhantes a um capacitor de placas paralelas, o campo elétrico macroscópico é definido como:

$$E_M = \frac{V}{d} \quad (2.14)$$

onde V é a tensão aplicada entre anodo e catodo, que estão separados por uma distância d .

O campo elétrico E é o campo ao longo da superfície das pontas (ou bem próximo a uma distância da ordem de 1 nm da superfície) que determina a barreira de potencial por onde os elétrons serão tunelados. Normalmente, os valores de E que fazem com que uma quantidade significativa de elétrons tunelem partem de 10^7 V/cm e são significativamente maiores do que E_M . A Figura 2.4 mostra, através da convergência das linhas de campo, como o campo elétrico macroscópico E_M é geometricamente aumentado para E próximo da superfície da ponta [24].

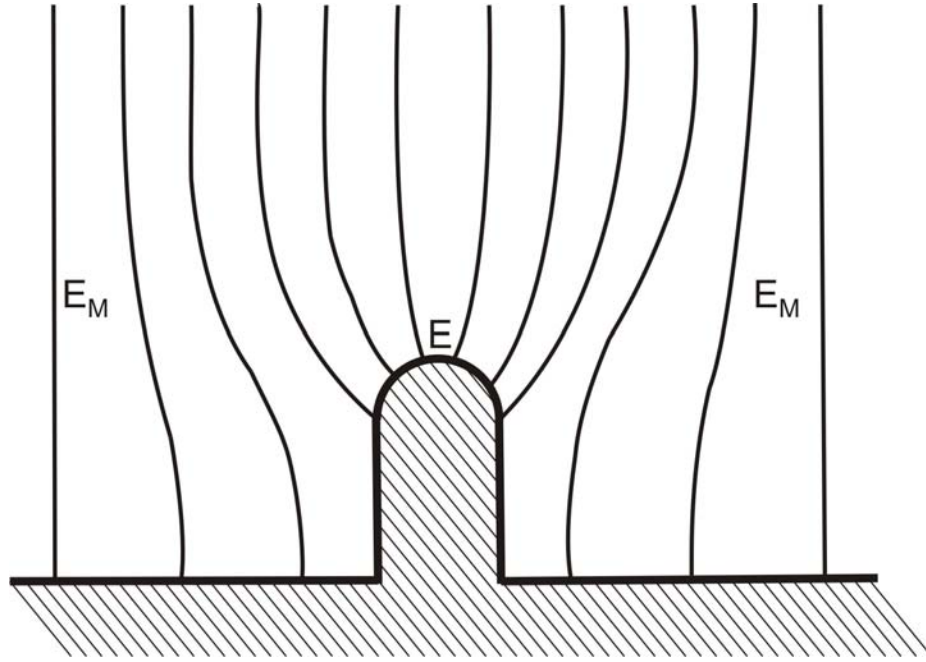


Fig. 2.4 – Esquema representativo das linhas de campo E_M e E . Adaptada de [24].

Normalmente, o campo elétrico na superfície da ponta E é mencionado na literatura através de dois métodos [25]. O primeiro é através da expressão

$$E = \frac{V}{Kr} \quad (2.15)$$

onde r é o raio de curvatura da ponta e K , uma constante adimensional que pode variar de 5 a 100, dependendo das dimensões geométricas da ponta e da distância do anodo.

O segundo método é o mais comum e a expressão é a mesma citada na Equação (2.9)

$$E = \beta V$$

onde β é o fator de conversão de campo e sua magnitude está relacionada com a geometria e dimensões da ponta.

A razão entre E e E_M é definida como fator de enriquecimento de campo γ

$$\gamma = \frac{E}{E_M} \quad (2.16)$$

onde γ é adimensional.

Se substituirmos as Equações (2.9) e (2.14) na Equação (2.16), obtemos

$$\gamma = \frac{\beta V}{\left(V/d\right)} = \beta d \quad (2.17)$$

Recentemente, em algumas literaturas, o símbolo utilizado para representar o fator de enriquecimento de campo é o β . Considerando que este tem sido usado por muito tempo para representar o fator de conversão de campo [26], optamos em utilizar o símbolo γ para representar o fator de enriquecimento de campo, assim como nos trabalhos [25-29], e o β para representar o fator de conversão de campo.

2.3 – Modelos Geométricos de Pontas de Emissão de Campo

Na literatura, existem diferentes modelos geométricos para as pontas de emissão de campo [30], como mostra a Figura 2.5.

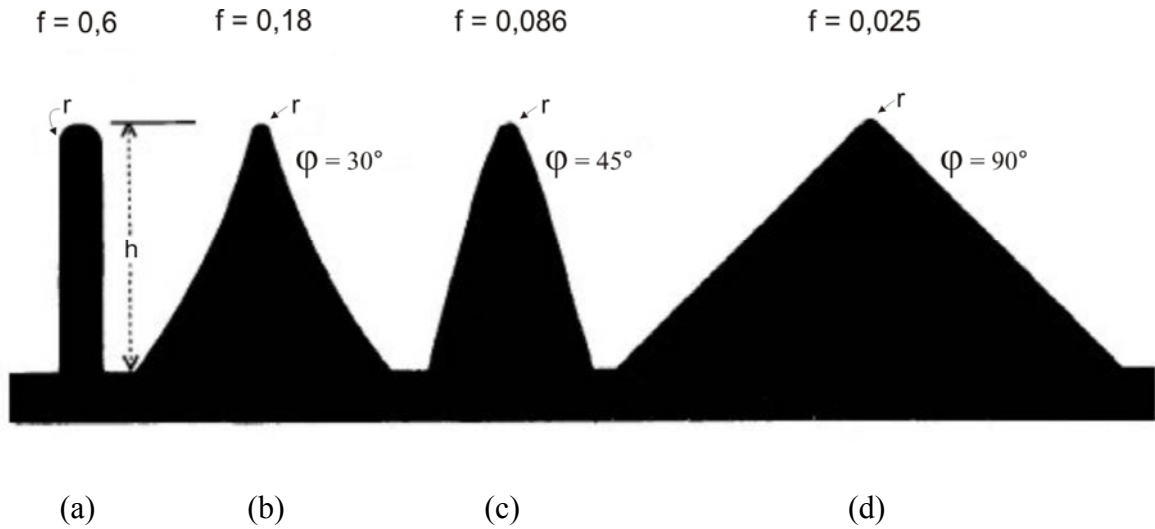


Fig. 2.5 – Modelos geométricos de emissores de campo com suas respectivas figuras de mérito. (a) Hemisfério sobre um poste; (b) pirâmide afinada; (c) hemi-elipsóide; (d) piramidal. Adaptada de [30].

Uma maneira de comparação entre os modelos geométricos das características de emissão de campo é através da figura de mérito, definida como

$$f_i = \left(\frac{I_i}{I_0} \right) \cdot \left(\frac{V_i}{V_0} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{L_i}{L_0} \right)^{-1} \quad (2.18)$$

onde I_i , V_i e L_i são corrente de emissão, tensão entre anodo-catodo e dimensões, respectivamente, de uma determinada ponta i . I_0 , V_0 e L_0 são os mesmos parâmetros definidos anteriormente, só que para uma ponta emissora considerada ideal.

A figura de mérito é baseada no conceito de aumentar a corrente de emissão e, ao mesmo tempo, diminuir a tensão de operação e as dimensões das pontas.

Um modelo considerado ideal para as pontas emissoras, porém não real, é uma esfera metálica flutuante com potencial de 0 V. A figura de mérito para cada modelo está indicada na Figura 2.5, e pode-se concluir que, entre elas, o modelo hemisfério sobre um poste (fig. 2.5a) é o mais próximo do ideal, enquanto o modelo piramidal com grande ângulo de abertura (fig. 2.5d) é considerado o pior.

Os modelos geométricos mais utilizados para o estudo das características de emissão de campo, em particular o fator de enriquecimento de campo γ , são um hemisfério sobre um plano, uma esfera flutuante e um hemisfério sobre um poste [26], como mostra a Figura 2.6.

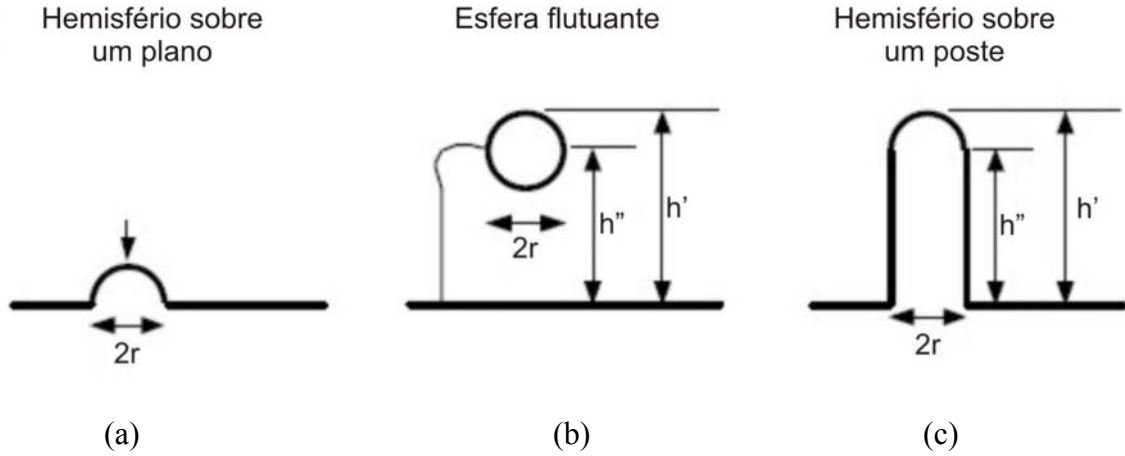


Fig. 2.6 – Modelos geométricos / matemáticos para o estudo do fator de enriquecimento de campo. (a) Hemisfério sobre um plano; (b) esfera flutuante; (c) hemisfério sobre um poste. Adaptada de [26].

Para o modelo hemisfério sobre um plano (fig. 2.6a), o fator de enriquecimento de campo pode ser definido de forma exata como $\gamma = 3$. Já para os modelos esfera flutuante (fig. 2.6b) e hemisfério sobre um poste (fig. 2.6c), a expressão matemática para o fator de enriquecimento de campo pode ser definida como

$$\gamma = m + \frac{h}{r} \quad (2.19)$$

onde h e r são a altura e o raio, respectivamente, da esfera ou do hemisfério, e m é uma constante, sendo que o seu valor depende de como h é definido (como h' ou h'' nas Figuras 2.6b e 2.6c).

Resultados de simulações mostram que, dependendo da relação h/r e também da distância entre anodo e catodo d , o γ pode ser estimado de outras maneiras, além da Equação (2.19), a fim de se chegar a valores mais precisos.

2.3.1 – Modelo Usado no Trabalho – Hemisfério Sobre um Poste

O modelo hemisfério sobre um poste vem sendo utilizado em estudos para representar, além das ponteiros, novos dispositivos de emissão de campo, como, por exemplo, nanotubos de carbono e nanofios. Para se analisar as propriedades do modelo, é necessário assumir que a ponta tenha uma geometria simétrica e esteja orientada de maneira perpendicular ao eletrodo planar, como mostra o esquema da Figura 2.7.

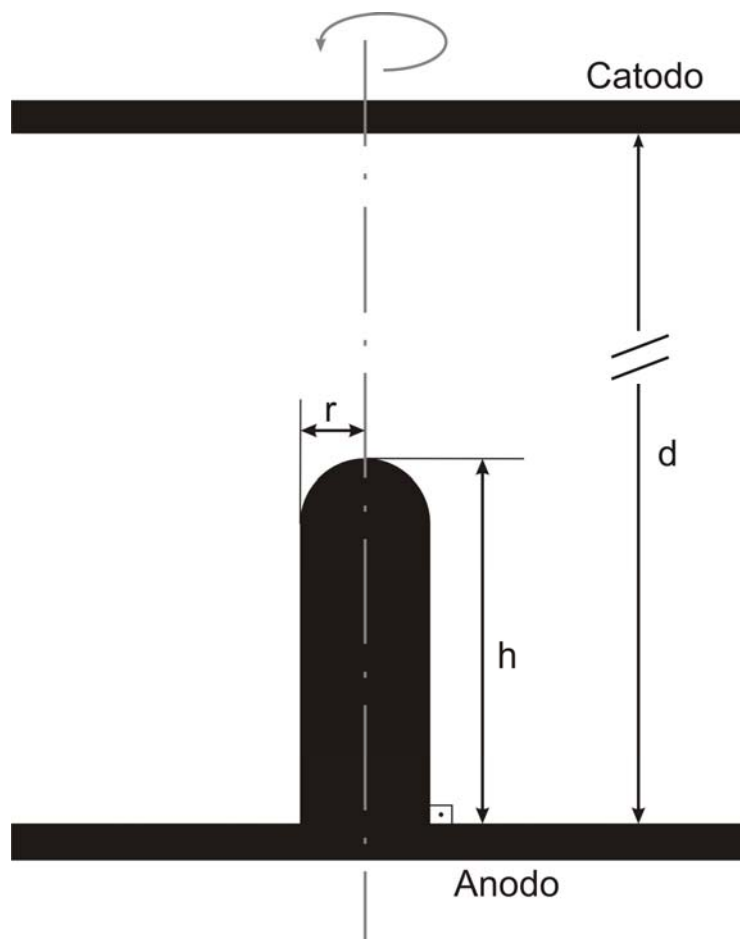


Fig. 2.7 – Esquema do modelo hemisfério sobre um poste.

Em termos geométricos, o modelo hemisfério sobre um poste é mais realista do que o modelo esfera flutuante. Pesquisadores como Latham, Xu e Rohrbach [26] publicaram trabalhos com resultados relevantes do desenvolvimento matemático para a determinação do enriquecimento de campo γ em função das dimensões geométricas (h, r, d) . Na maioria dos casos, o h é definido como sendo a altura total da ponta, ou seja, a altura do poste mais o raio do hemisfério.

De acordo com Rohrbach [26], uma função apropriada para determinar o fator de enriquecimento de campo em função de h/r é

$$\gamma = 2 + \frac{h}{r} \quad (2.20)$$

Para configurações onde $h \gg r$, o termo m (com valor 2) é desprezível e a Equação (2.20) pode ser reescrita como

$$\gamma = \frac{h}{r} \quad (2.21)$$

Sendo as dimensões das pontas na maioria dos casos bem menores do que as dimensões dos aparatos experimentais (como, por exemplo, a distância entre anodo e catodo d e a própria dimensão do ambiente de vácuo), Miller mostrou [31] que o fator de enriquecimento de campo γ também depende da distância d entre os eletrodos através da seguinte relação

$$\gamma = \gamma_{\infty} \left(1 - \frac{h}{d} \right) \quad (2.22)$$

onde γ_{∞} é o valor de γ quando $d \gg h$. Na prática, o termo h/d é, na maioria das vezes, bem menor do que 1, resultando em sua não utilização.

Capítulo 3

Procedimento Utilizado para a Simulação de uma Ponteira de Emissão de Campo

Neste capítulo, apresentaremos uma breve descrição do método dos elementos finitos (FEM - finite element methods), que é uma importante ferramenta para a realização deste trabalho, em especial para a determinação dos valores do campo elétrico E ao longo da superfície da ponteira. Também será apresentado o procedimento aplicado para a simulação de uma ponteira de emissão de campo utilizando como ferramenta o pacote do software comercial Ansys, que se baseia no FEM para as análises dos resultados. Por fim, mostraremos como, a partir dos valores do campo elétrico extraídos do software Ansys, chega-se a uma estimativa da corrente de emissão I da ponteira.

3.1 – Método dos Elementos Finitos

Há alguns anos, o FEM tem se consagrado como uma das mais poderosas ferramentas utilizadas para a determinação das distribuições de campos eletromagnéticos em dispositivos e sistemas elétricos. O FEM é definido como um método matemático para a solução de equações diferenciais parciais, tais como as equações de Poisson e Laplace.

Sua origem se deu na década de 1940, sendo que se popularizou no meio científico e industrial apenas nas décadas de 1970 e 80, devido à redução dos custos das estações de trabalho de alto desempenho e do desenvolvimento acelerado dos microcomputadores.

O trabalho que marcou a aplicação do FEM na engenharia elétrica é creditado ao desenvolvido por Silvester e Chari [32] em 1970. A partir de então, uma série de pesquisadores dedicaram esforços no sentido de aplicá-lo na resolução dos maiores

problemas da engenharia elétrica, que é o cálculo de campos eletromagnéticos presentes em diversas partes nos dispositivos e sistemas elétricos.

Apesar das equações de Maxwell descreverem os fenômenos eletromagnéticos, sua solução analítica torna-se impraticável em domínios com características não-homogêneas e de formatos irregulares. Uma alternativa para contornar este problema é a utilização de métodos de cálculo numérico para se obter uma solução aproximada.

O FEM é um entre os vários métodos conhecidos de cálculo numérico para fenômenos eletromagnéticos. Ele pode ser aplicado sem as limitações ou dificuldades de implementação que existem em alguns outros métodos. Por exemplo, em regiões onde existe muita variação e ou alta intensidade do campo eletromagnético, pode-se usar elementos menores (malha refinada) do que em outras regiões, onde a variação do campo e ou a intensidade são menores. Esta situação é em geral difícil ou até mesmo impossível de ser tratada de maneira eficiente com outros métodos, como, por exemplo, o das diferenças finitas.

Para utilizar o FEM, o objeto de estudo deve ter a sua geometria subdividida (ou discretizada) em várias partes, que são os chamados elementos finitos. As Figuras 3.1a e 3.1b mostram a geometria de uma ponteira na forma de um hemisfério sobre um poste e sua malha de elementos finitos.

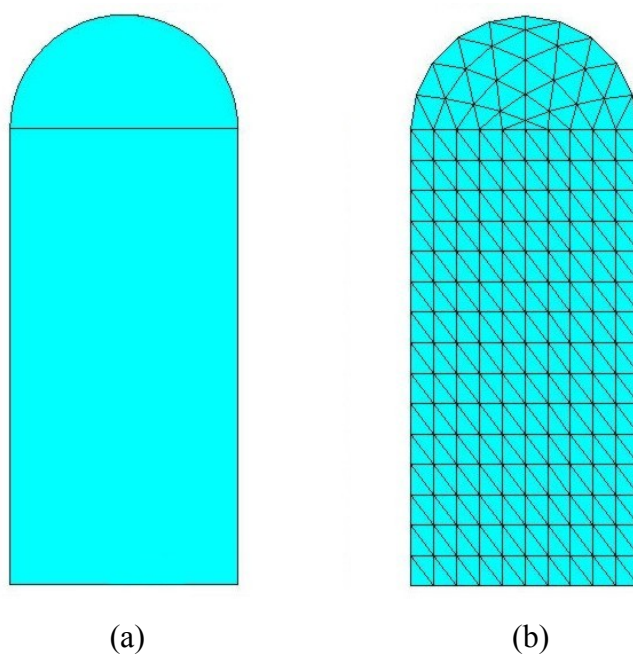


Fig. 3.1 – (a) Geometria de uma ponteira; (b) malha de elementos finitos da ponteira.

Como pode ser visto através da Figura 3.1b, os elementos só podem se conectar pelos vértices, não podendo haver conexões entre um vértice e um lado de outro elemento, e não deve existir superposição nem buracos entre os elementos.

A subdivisão de uma geometria é chamada de malha, sendo geralmente constituída, no caso bidimensional, de triângulos ou quadriláteros, cujos vértices são denominados nós da malha. A Figura 3.2 mostra um elemento de duas dimensões (2D) na forma de um triângulo com seus respectivos nós.

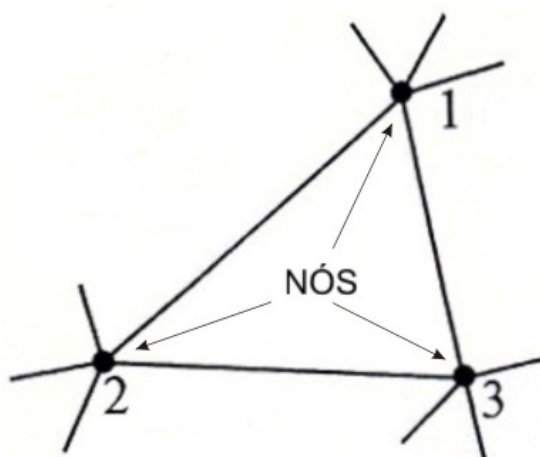


Fig. 3.2 – Elemento triangular 2D.

É através da malha que se monta um sistema de equações, cuja solução permite determinar as grandezas de interesse no fenômeno utilizado. No caso eletromagnético, essa solução é o vetor potencial magnético (A) ou o potencial elétrico (V) em cada um dos nós da malha, a partir dos quais é possível determinar os campos magnéticos ou elétricos no interior dos elementos finitos.

Geralmente, em problemas envolvendo eletromagnetismo, o FEM está associado ao método variacional ou residual [33]. No método variacional, como, por exemplo, o método de Ritz ou Rayleigh-Ritz, o procedimento numérico é feito em termos de expressões variacionais chamadas de funções. A desvantagem do método variacional é que, para cada problema, tem-se que estabelecer uma função específica; torna-se desvantajoso também por não se trabalhar diretamente com as equações físicas relacionadas ao problema e sim com a função correspondente ao problema.

Já no residual, como, por exemplo, o método de Galerking, o procedimento numérico é feito diretamente das equações físicas. Esta é a grande vantagem sobre o método variacional, resultando em uma maneira mais simples e fácil de ser aplicado aos problemas.

A aplicação do FEM na eletrostática é baseada na seguinte equação de Maxwell:

$$\text{div}D = \rho \quad (3.1)$$

onde D é a densidade de fluxo elétrico ou indução elétrica e ρ é a densidade de carga.

A densidade de fluxo elétrico D e o campo elétrico E estão relacionados da seguinte forma:

$$D = \varepsilon E \quad (3.2)$$

onde ε é a permissividade do material, que é definida como

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (3.3)$$

onde ε_r é a permissividade relativa, e ε_0 é a permissividade do espaço livre ($\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$).

Substituindo a Equação (3.2) na Equação (3.1), obtemos

$$\text{div}\varepsilon E = \rho \quad (3.4)$$

O campo elétrico E e o potencial elétrico V estão relacionados através da expressão

$$E = -\text{grad}V \text{ ou } E = -\nabla V \quad (3.5)$$

Substituindo a Equação (3.5) na Equação (3.4), obtemos

$$\text{div}(\varepsilon \text{grad} V) = -\rho \quad \text{ou} \quad \frac{\partial}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial V}{\partial y} = -\rho \quad (3.6)$$

A Equação (3.6) é conhecida como equação de Poisson, a qual descreve a distribuição de potencial em um domínio. Se o domínio contém apenas um tipo de material, a permissividade ε é considerada constante, e a Equação (3.6) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (3.7)$$

Quando a densidade de carga presente no domínio em estudo for considerada nula ($\rho = 0$), a Equação (3.6) é reescrita como

$$\frac{\partial}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (3.8)$$

conhecida também como equação de Laplace.

A partir das características do elemento (no caso da Figura 3.2, elemento triangular de primeira ordem) e da Equação (3.8), chega-se à seguinte matriz para cada elemento do domínio.

$$\frac{\varepsilon}{2D} \begin{bmatrix} (q_1 q_1 + r_1 r_1) & (q_1 q_2 + r_1 r_2) & (q_1 q_3 + r_1 r_3) \\ \text{simétrica} & (q_2 q_2 + r_2 r_2) & (q_2 q_3 + r_2 r_3) \\ \text{simétrica} & \text{simétrica} & (q_3 q_3 + r_3 r_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

onde D é duas vezes a área do elemento, p_i , q_i e r_i ($i=1,2,3$) são coeficientes obtidos por permutação cíclica dos índices, e V_i é a tensão em cada nó do elemento. Em seguida, os coeficientes das matrizes de cada elemento são alocados de forma expedita em uma matriz global, com dimensão $N \times N$, na qual N é o número total de nós do domínio. Após a definição das condições de contorno, é feita a solução do sistema, resultando no potencial

em cada um dos nós do domínio. Uma visão mais detalhada da maneira com que se monta o sistema e sua solução pode ser encontrada na literatura [33-35].

3.1.1 – Características de um Software Baseado no FEM

As tarefas em um software baseado no FEM costumam ser divididas em três etapas, chamadas de pré-processamento, processamento e pós-processamento.

O pré-processamento engloba o desenho da geometria do objeto em estudo, a geração da malha, a especificação das propriedades físicas dos meios envolvidos, isto é, dos materiais que constituem o objeto (ferro, cobre, ar, silício, molibdênio, etc.), as especificações das fontes de campo no objeto (densidade de corrente elétrica em bobinas ou densidade de cargas elétricas nos materiais, quando presentes) e a especificação das condições de contorno pertinentes ao fenômeno e ao objeto analisado.

O processamento inclui a montagem do sistema de equações, baseado nos dados definidos na etapa de pré-processamento e a sua resolução.

Por fim, na etapa de pós-processamento, é possível visualizarmos o cálculo e a apresentação das grandezas do fenômeno estudado, como, por exemplo, as linhas de campos ou linhas equipotenciais sobre a geometria em estudo; os que calculam energia, força, temperatura, torque, campos elétricos, etc.; os que traçam gráficos de campos e potenciais sobre segmentos definidos no objeto em estudo; e outros mais específicos para alguns fenômenos ou grandezas.

3.2 – Cálculo do Campo Elétrico Utilizando-se o Software Ansys

Durante a realização deste trabalho, a ferramenta escolhida para a simulação das ponteiros para o cálculo do campo elétrico foi o software comercial Ansys, que utiliza o FEM nas análises dos fenômenos físicos. Diversos pesquisadores que trabalham com microdispositivos de emissão de campo a vácuo vêm utilizando o software Ansys como ferramenta em análises de campos eletrostáticos [36-40]. Estas determinam o campo elétrico e a distribuição do potencial elétrico em uma estrutura, causados por uma distribuição de cargas ou por uma diferença de potencial. O software Ansys assume que

uma análise eletrostática seja linear, ou seja, o resultado do campo elétrico é diretamente proporcional à tensão aplicada no objeto em estudo.

O diagrama da Figura 3.3 mostra a seqüência das etapas a serem feitas no software Ansys para a simulação das ponteiras. Em seguida, as etapas serão descritas em detalhes.

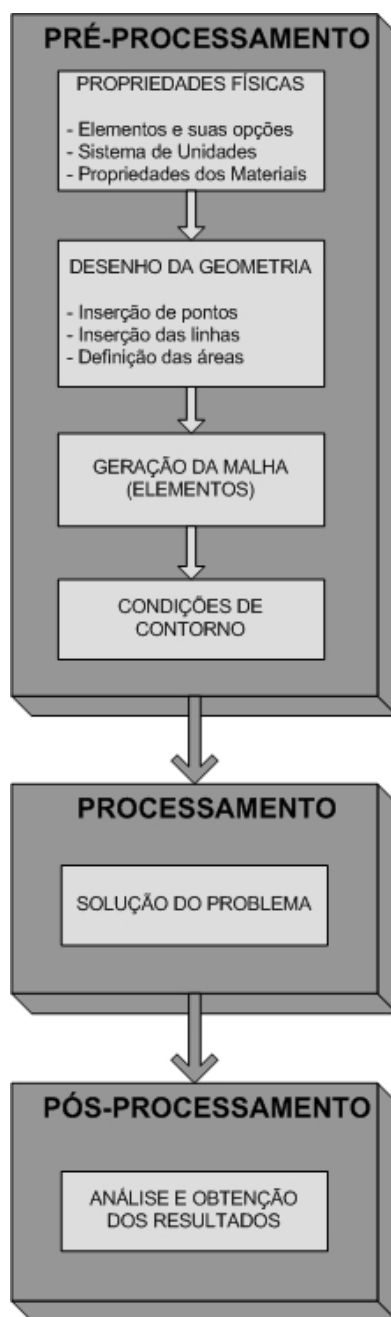


Fig. 3.3 – Diagrama das etapas a serem feitas no software Ansys para a simulação das ponteiras.

3.2.1 – Pré-Processamento

Propriedades Físicas

No software Ansys, é possível fazer análises em diversos segmentos, como elétrico, magnético, térmico, estrutural, fluidodinâmico, entre outros. O Ansys possui uma biblioteca com mais de 150 tipos de elementos, que são divididos por segmentos. Cada elemento possui características como, por exemplo, dimensão (2D ou 3D), geometria (quadriláteros, triângulos ou cúbicos), grau de liberdade (tensão, corrente ou temperatura) e formulação matemática, em que está baseado (eletrostática, magnetismo ou elétrica).

Para a simulação das ponteiros de emissão de campo, considerando-se as condições de se realizar uma análise eletrostática e em duas dimensões, o software Ansys apresenta como opção o elemento PLANE121 [41], que é composto por oito nós (I, J, K, L, M, N, O e P), pode ser implementado na forma de quadrilátero ou triângulo e tem como grau de liberdade a tensão (Volts). A Figura 3.4 mostra as geometrias do elemento PLANE121.

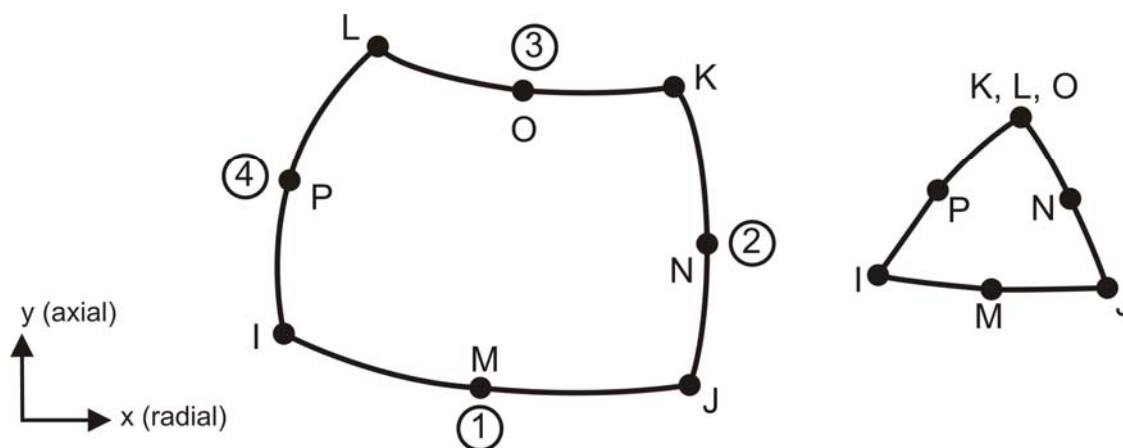


Fig. 3.4 - Geometria do elemento PLANE121 [41].

A formulação matemática do elemento PLANE121 está baseada na equação de Poisson (3.6). Levando-se em consideração que, para a simulação das ponteiros, a densidade de cargas no domínio é nula ($\rho = 0$), pode-se dizer que a Equação de Laplace (3.8) é a base utilizada para o cálculo dos campos elétricos ao longo do domínio em estudo [39-41].

Dispositivos de emissão de campo a vácuo costumam ser implementados e ou analisados em ambientes de vácuos relativamente grandes (como, por exemplo, câmaras de vácuo) se comparados com as dimensões dos dispositivos como as ponteiras. Se for seguir a mesma linha de raciocínio para a simulação, áreas enormes teriam que ser implementadas no domínio em estudo para representar o ambiente de vácuo, o que acarretaria em uma malha com grande quantidade de elementos e, consequentemente, no uso de máquinas de alto desempenho para a solução do problema. Caso a área de vácuo seja implementada de maneira a envolver apenas o dispositivo de emissão de campo, efeitos de borda poderiam influenciar no resultado final do campo elétrico [42].

Uma solução para este problema é o uso de elementos que representam ambientes grandes (domínios abertos), porém são implementados no software por áreas relativamente pequenas. No software Ansys, o elemento INFIN110 é utilizado para representar domínios abertos em análises eletrostáticas e em duas dimensões [41]. A Figura 3.5 mostra a geometria do elemento INFIN110.

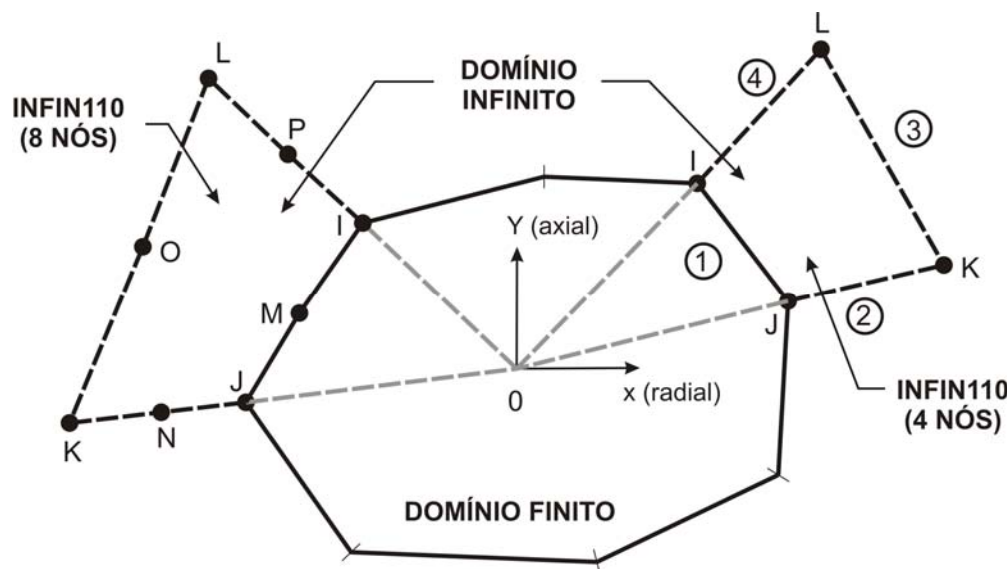


Fig. 3.5 - Geometria do elemento INFIN110 [41].

O elemento INFIN110 pode ser representado apenas na forma de quadrilátero e é composto por quatro (I, J, K e L) ou oito (I, J, K, L, M, N, O e P) nós.

Tanto o elemento PLANE121 como o INFIN110 podem ser utilizados na forma plana ou axissimétrica. Domínios implementados na forma plana são inseridos e

considerados como áreas (duas dimensões). Já domínios implementados na forma axissimétrica são inseridos no formato de áreas, porém são considerados volumes (três dimensões) pelo software. Uma estrutura é considerada axissimétrica quando seu eixo de simetria coincide com o eixo y do sistema cartesiano. As Figuras 3.6a e 3.6b mostram uma ponteira em um ambiente de vácuo implementada na forma axissimétrica.

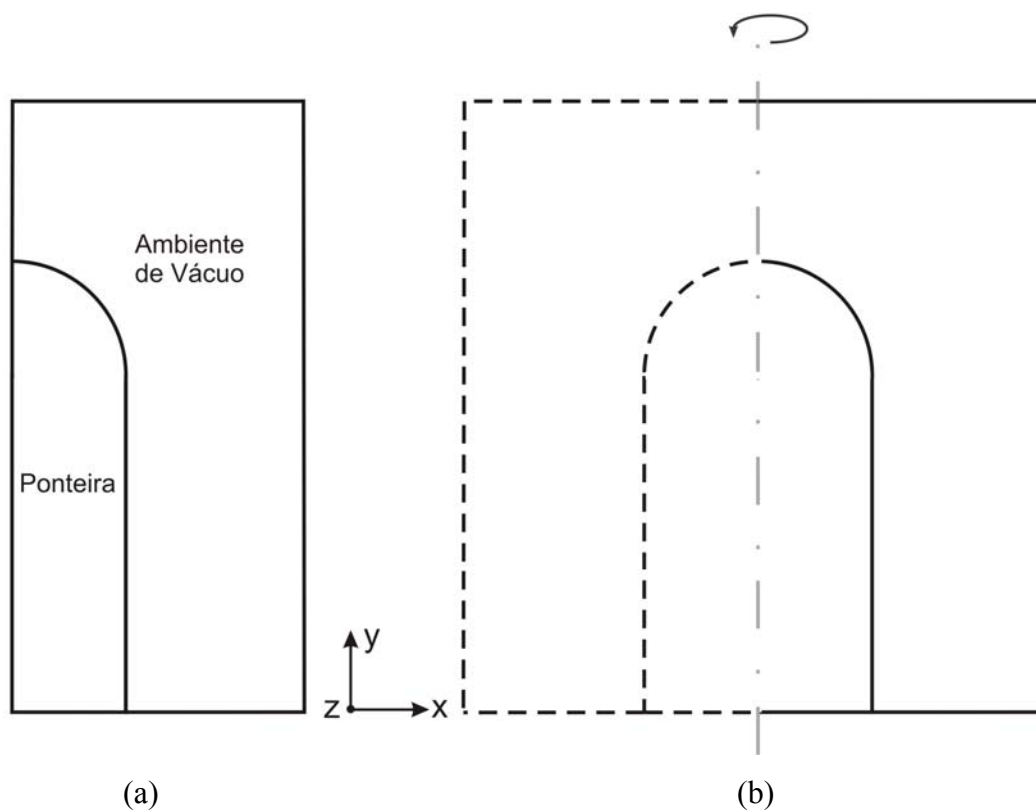


Fig. 3.6 – Esquema de uma estrutura implementada na forma axissimétrica. (a) Estrutura inserida no software; (b) estrutura considerada pelo software.

O sistema padrão de unidades no software Ansys é o MKS, no qual a permissividade do vácuo (ϵ_0) é $8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ [41]. O software Ansys requer que todos os dados inseridos, como dimensões geométricas, propriedades físicas dos materiais, condições de contorno, entre outras, estejam consistentes com um único sistema de unidades. Em aplicações nas quais as dimensões são muito pequenas, como em sistemas micro-eletromecânicos (MEMS – Micro Electro Mechanical Systems), é conveniente trabalhar com o sistema de unidades μMKS , em que a permissividade do vácuo é $8,854 \times 10^{-6} \text{ pF} / \mu\text{m}$.

O software Ansys permite que sejam especificadas diversas características dos materiais que compõem a estrutura analisada, como permissividade, resistividade, permeabilidade, temperatura, etc. Em análises de campos eletrostáticos, é necessária a definição da permissividade relativa (ϵ_r) dos materiais.

Desenho da Geometria

O desenho da estrutura, que é composta pela ponteira, pelo ambiente de vácuo e pelo eletrodo, é feito no software Ansys, utilizando-se as ferramentas da computação gráfica, como, por exemplo, pontos, linhas, arcos, áreas, etc. A Figura 3.7 mostra o desenho da estrutura a ser inserida no software na forma axissimétrica (o eixo y é o de simetria e a estrutura será desenhada apenas no lado positivo do eixo x).

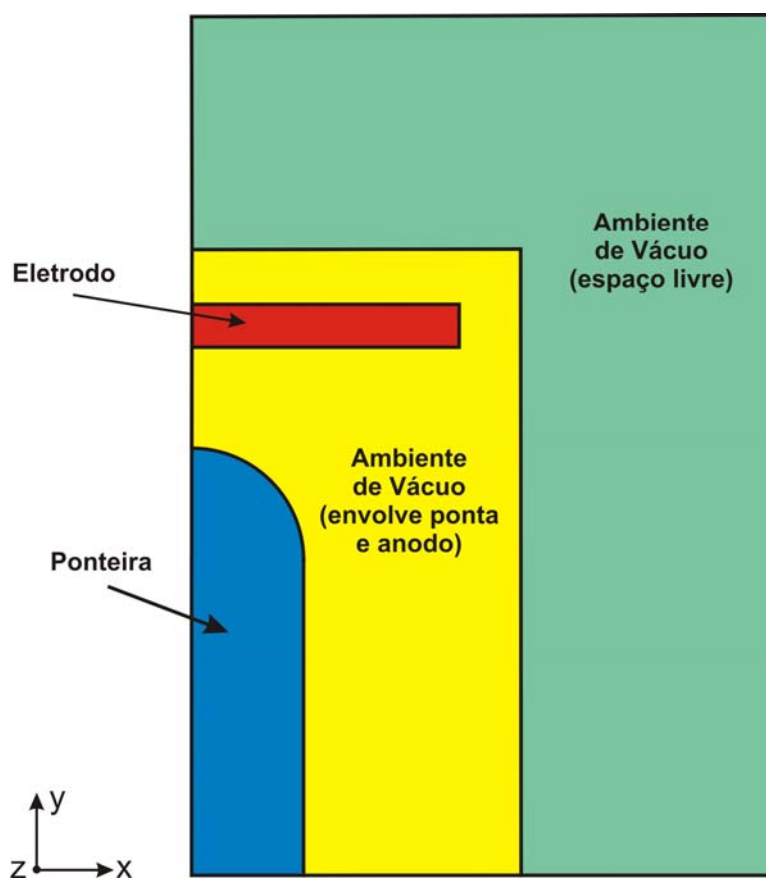


Fig. 3.7 – Geometria inserida no software

Como pode ser visto através da Figura 3.7, o ambiente de vácuo é composto por duas áreas, das quais a em amarelo representa o vácuo próximo da ponteira e do eletrodo (envolve os dois), e a outra área em verde representa o domínio aberto, no qual será utilizado o elemento INFIN110 na geração da malha.

Geração da Malha (Elementos)

A etapa de geração da malha é considerada a mais importante em análises que utilizam o FEM. Esta etapa consiste em transformar toda a geometria criada anteriormente por pontos, linhas, arcos e áreas em um modelo de elementos finitos, compostos por nós e elementos, subdividindo a geometria do domínio em pequenos subdomínios, respeitando as fronteiras de cada área.

A densidade de elementos costuma ser elevada em regiões onde se espera uma maior concentração do campo elétrico [37,42]. No caso das simulações das ponteiras de emissão de campo, a maior concentração do campo elétrico está localizada na extremidade do hemisfério, na parte superior da ponteira.

Ao gerarmos a malha nas áreas que compõem a estrutura analisada, o software Ansys permite que sejam especificadas a densidade e a maneira de como os elementos ficarão distribuídos ao longo das áreas. É possível especificar a quantidade de divisões nas linhas que representam as áreas e, a partir destas divisões, a malha é gerada. Quanto maior a quantidade de divisões nas linhas, maior será a densidade de elementos. Também é possível direcionarmos para onde ficará a maior concentração de elementos. Este procedimento é chamado de refinamento da malha, sendo que a precisão dos resultados obtidos na etapa de pós-processamento é altamente dependente da maneira que é feito este refinamento. Para se ter uma visão mais clara disso, a Figura 3.8 mostra uma parte da ponteira com as linhas divididas, concentrando uma maior quantidade de divisões nas extremidades e na parte superior da ponteira. A partir destas divisões, a malha é gerada e o resultado é uma maior concentração de elementos na extremidade da ponta e na parte superior.

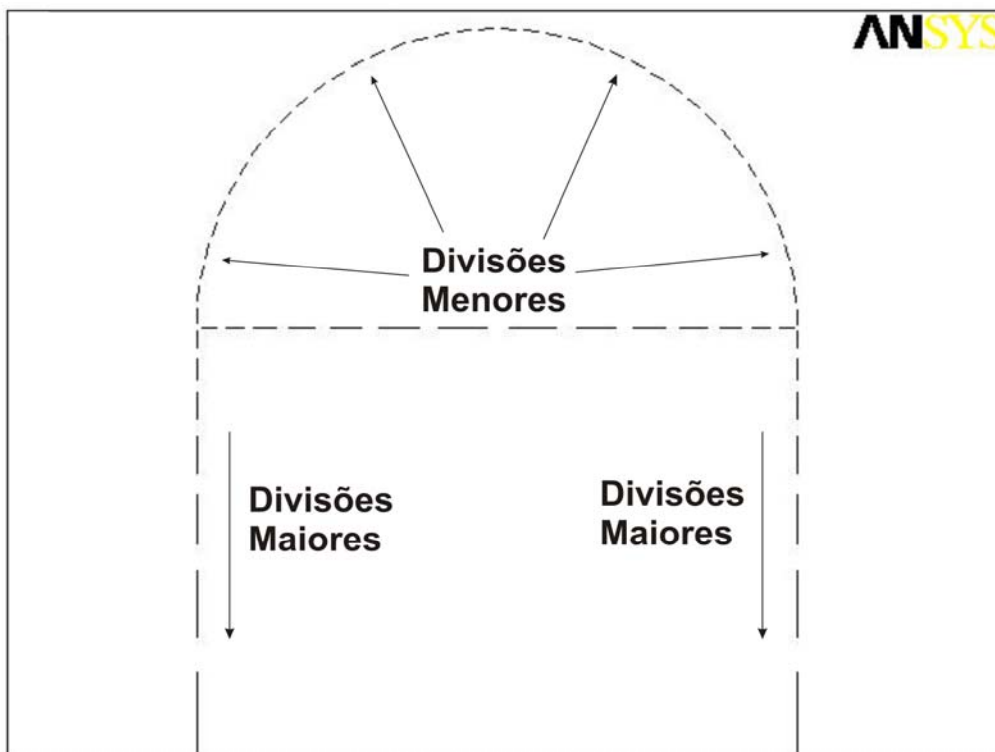


Fig. 3.8 – Refinamento da malha na ponteira.

A princípio, não existem regras que definem a quantidade exata de elementos, e a maneira de como eles devem estar distribuídos ao longo da estrutura analisada para se obter resultados mais precisos na etapa de pós-processamento. Para a execução deste trabalho, dois procedimentos foram utilizados para se fazer o refinamento da malha.

O primeiro procedimento foi comparar os resultados na etapa de pós-processamento, ou seja, após a obtenção do primeiro resultado, é feito o refinamento nos pontos críticos e, então, verifica-se se os resultados estão próximos uns dos outros. Este procedimento é feito até que a diferença de um resultado para o outro seja menor do que 1% [37].

O outro procedimento utilizado foi comparar os resultados calculados de duas maneiras. O software Ansys pode calcular a intensidade e a distribuição do campo elétrico, através dos nós da malha ou através dos elementos da malha [41]. Novamente, o refinamento é feito até que os resultados dos dois cálculos estejam próximos um do outro, com diferença menor do que 1%.

A Figura 3.9 mostra a malha em toda a estrutura analisada. Ela é apenas representativa, considerando que a quantidade de elementos não condiz com a realidade, que, em alguns casos, pode chegar a centenas de milhares de elementos, além de algumas dimensões estarem fora de escala.

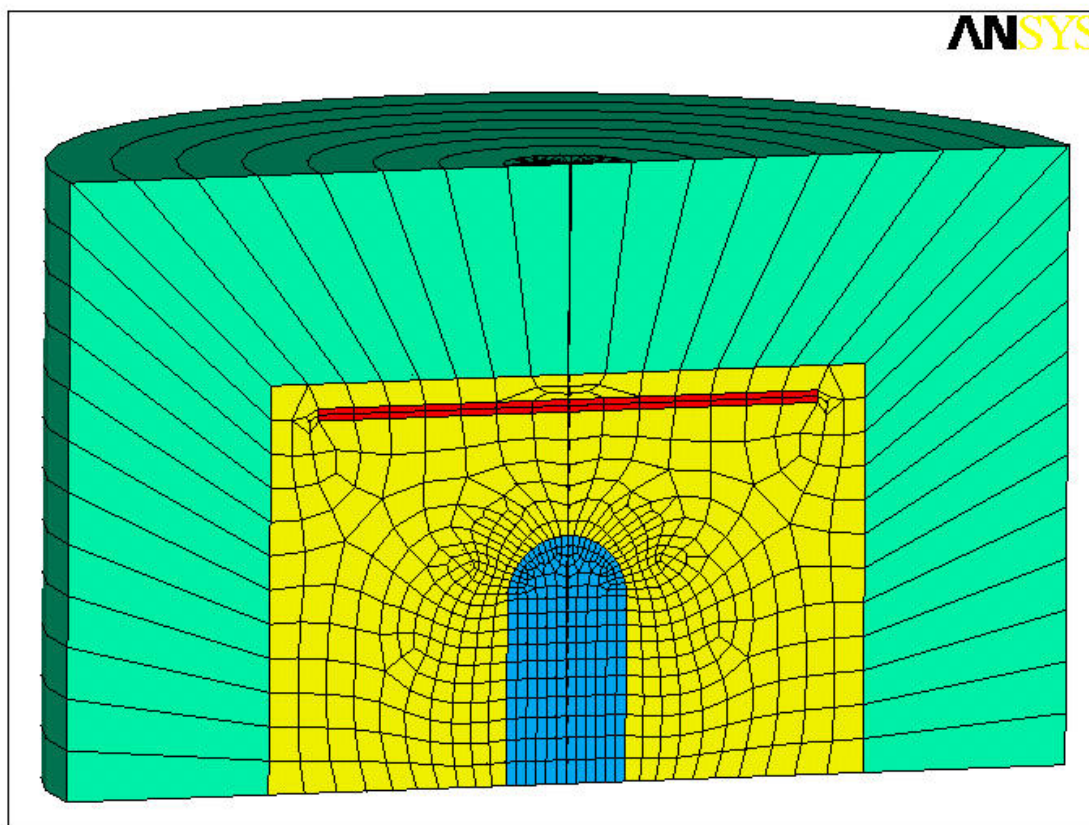


Fig. 3.9 – Seção transversal da estrutura analisada após a geração da malha. A região azul representa a ponteira, a região amarela representa o ambiente de vácuo, a região em vermelho representa o eletrodo e a região em verde representa o domínio aberto.

Condições de Contorno

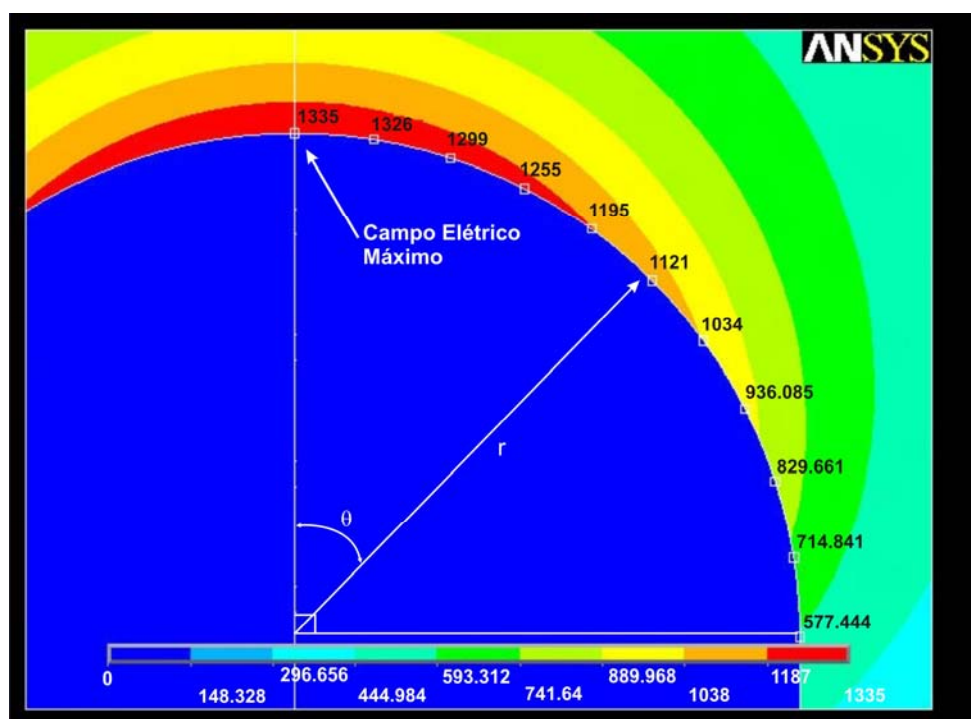
Para a conclusão da etapa de pré-processamento, as condições de contorno devem ser definidas. Sendo o grau de liberdade do elemento PLANE121 a tensão (em Volts), uma diferença de potencial é aplicada entre o eletrodo (anodo) e a ponteira (catodo).

3.2.2 – Processamento e Pós Processamento

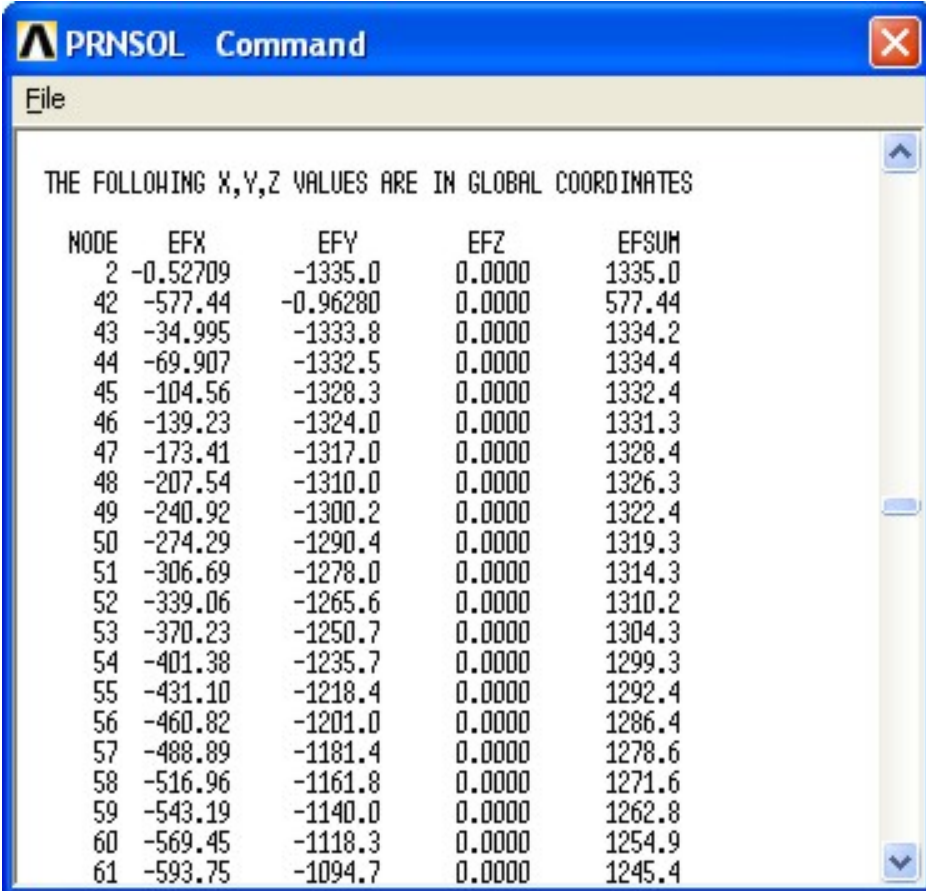
A etapa de processamento consiste na solução do problema. Baseado nas informações e condições definidas na etapa de pré-processamento, o software calcula os resultados.

A etapa de pós-processamento consiste na verificação dos resultados. O software Ansys pode apresentar os resultados de maneira gráfica na própria estrutura analisada, na forma de listas e também na forma de gráficos.

Para a realização deste trabalho, os resultados utilizados fornecidos pelo software Ansys foram a intensidade máxima do campo elétrico E , que está localizado no topo da ponteira ($\theta = 0$), e a intensidade do E em cada nó da superfície do hemisfério (cada valor do campo elétrico está associado a um ângulo θ de 0 a 90°). As Figuras 3.10a e 3.10b mostram estes resultados na própria estrutura analisada e na forma de lista, respectivamente. A partir dos valores do campo elétrico, pode-se estimar a corrente de emissão da ponteira, como será explicado a seguir.



(a)



THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
2	-0.52709	-1335.0	0.0000	1335.0
42	-577.44	-0.96280	0.0000	577.44
43	-34.995	-1333.8	0.0000	1334.2
44	-69.907	-1332.5	0.0000	1334.4
45	-104.56	-1328.3	0.0000	1332.4
46	-139.23	-1324.0	0.0000	1331.3
47	-173.41	-1317.0	0.0000	1328.4
48	-207.54	-1310.0	0.0000	1326.3
49	-240.92	-1300.2	0.0000	1322.4
50	-274.29	-1290.4	0.0000	1319.3
51	-306.69	-1278.0	0.0000	1314.3
52	-339.06	-1265.6	0.0000	1310.2
53	-370.23	-1250.7	0.0000	1304.3
54	-401.38	-1235.7	0.0000	1299.3
55	-431.10	-1218.4	0.0000	1292.4
56	-460.82	-1201.0	0.0000	1286.4
57	-488.89	-1181.4	0.0000	1278.6
58	-516.96	-1161.8	0.0000	1271.6
59	-543.19	-1140.0	0.0000	1262.8
60	-569.45	-1118.3	0.0000	1254.9
61	-593.75	-1094.7	0.0000	1245.4

(b)

Fig. 3.10 – Resultados extraídos do software Ansys. (a) Intensidade do campo elétrico nos nós da superfície do hemisfério (adaptada); (b) listagem com os valores do campo elétrico em cada nó.

Em análises eletrostáticas, o software Ansys também pode fornecer resultados, como a distribuição do potencial elétrico, distribuição do campo elétrico, trajetória do elétron, linhas de campo, etc. A Figura 3.11 mostra a distribuição do campo elétrico ao longo do domínio.

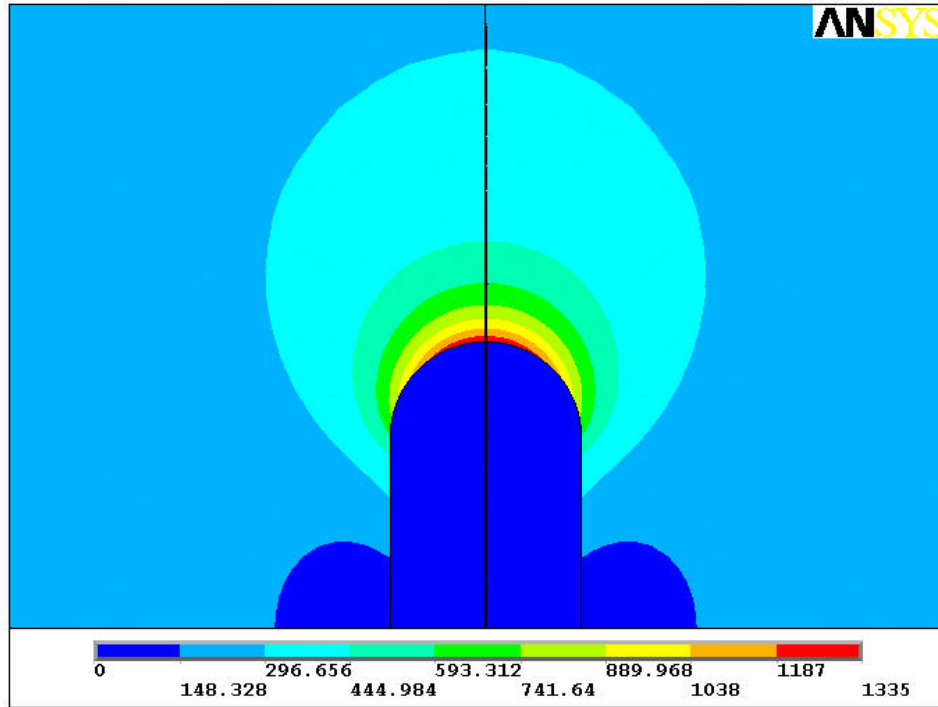


Fig. 3.11 – Distribuição do campo elétrico.

3.3 – Cálculo da Corrente de Emissão

Como descrito no Capítulo 2, Item 2.1, a Equação (2.8) de Fowler-Nordheim (F-N) está relacionada com o campo elétrico E , a densidade de corrente J e a função trabalho ϕ da seguinte forma:

$$J = 1,4 \times 10^{-6} \frac{E^2}{\phi} \exp\left(-6,53 \times 10^7 \frac{\phi^{3/2}}{E}\right) \exp\left(\frac{9,87}{\phi^{1/2}}\right)$$

Conhecendo a função trabalho ϕ do material da ponteira e de posse dos valores do campo elétrico E ao longo da superfície do hemisfério, a corrente de emissão pode ser calculada através da integral da densidade de corrente J sobre a superfície do emissor (hemisfério) [38], como

$$I = \iint_{emissor} J(E) ds \quad (3.10)$$

Para este propósito, foi desenvolvido um programa junto com o Prof. Dr. Ricardo da Silva Braga, na linguagem Delphi, na qual, a partir do raio de curvatura, é feita a integral da área da superfície do hemisfério de acordo com o passo angular dos resultados do campo elétrico E extraídos do software Ansys. Através da equação de Fowler-Nordheim, a densidade de corrente J foi aproximada na superfície do hemisfério, utilizando-se as fórmulas fechadas de Newton-Cotes. Também foi usada a fórmula de Lagrange para interpolar a função.

Capítulo 4

Apresentação e Discussão dos Resultados

Neste capítulo, apresentaremos os resultados obtidos através das simulações de uma ponteira de emissão de campo. O modelo da ponteira utilizado nas simulações foi no formato de um hemisfério sobre um poste. Este modelo também pode ser utilizado para representar outros dispositivos de emissão de campo, como nanotubos de carbono e nanofios. A Figura 4.1 mostra o esquema da ponteira com as indicações das dimensões geométricas utilizado durante as simulações.

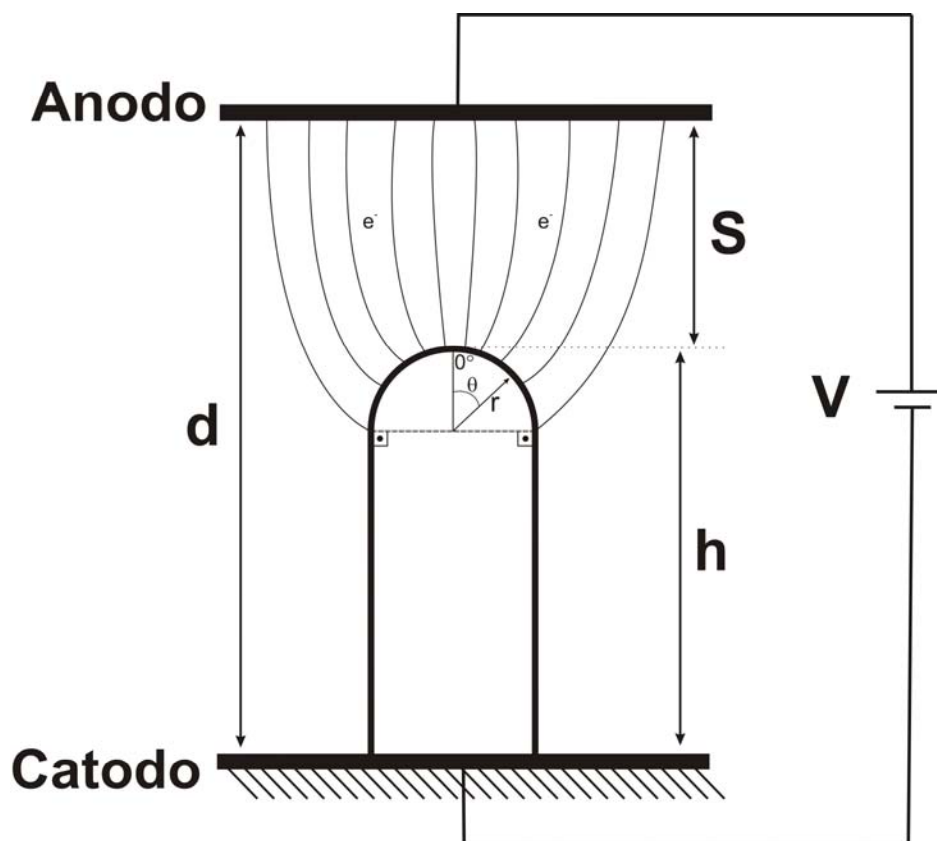


Fig. 4.1 – Esquema geométrico utilizado nas simulações.

onde

r = raio de curvatura do hemisfério;

θ = ângulo no hemisfério;

h = altura da ponteira;

d = distância entre anodo e catodo (base da ponteira)

S = distância entre anodo e o topo da ponteira ($S = d - h$);

V = tensão entre anodo e catodo.

Baseado nas variações das dimensões geométricas, como raio de curvatura, altura da ponteira, distância entre anodo e catodo, e também na tensão entre anodo e catodo, serão apresentados os resultados do comportamento elétrico da ponteira, como intensidade do campo elétrico E , corrente de emissão I , fator de enriquecimento de campo γ e fator de conversão de campo β . Em alguns casos, os resultados obtidos das simulações serão comparados com os resultados de expressões matemáticas que descrevem alguma grandeza física envolvendo emissão de campo.

Como descrito no Capítulo 3, os valores do campo elétrico E são obtidos através das simulações feitas no software Ansys. Já os resultados da corrente de emissão I são obtidos através do programa desenvolvido, que se baseia na teoria de emissão de campo de Fowler-Nordheim (F-N), nos valores do campo elétrico E ao longo da superfície do hemisfério e na área de emissão da ponteira α (o hemisfério).

4.1 – Curva Característica Corrente x Tensão (I x V) e Curva de Fowler-Nordheim (F-N)

Considerando a distância entre anodo e catodo d de 30 μm , altura da ponteira h de 1 μm , raio de curvatura do hemisfério r de 10, 20 e 50 nm, e função trabalho ϕ do material da ponteira de 4 eV, foram levantadas as três curvas $I \times V$ para verificar a relação entre a corrente emitida e a tensão aplicada no dispositivo, como mostra a Figura 4.2.

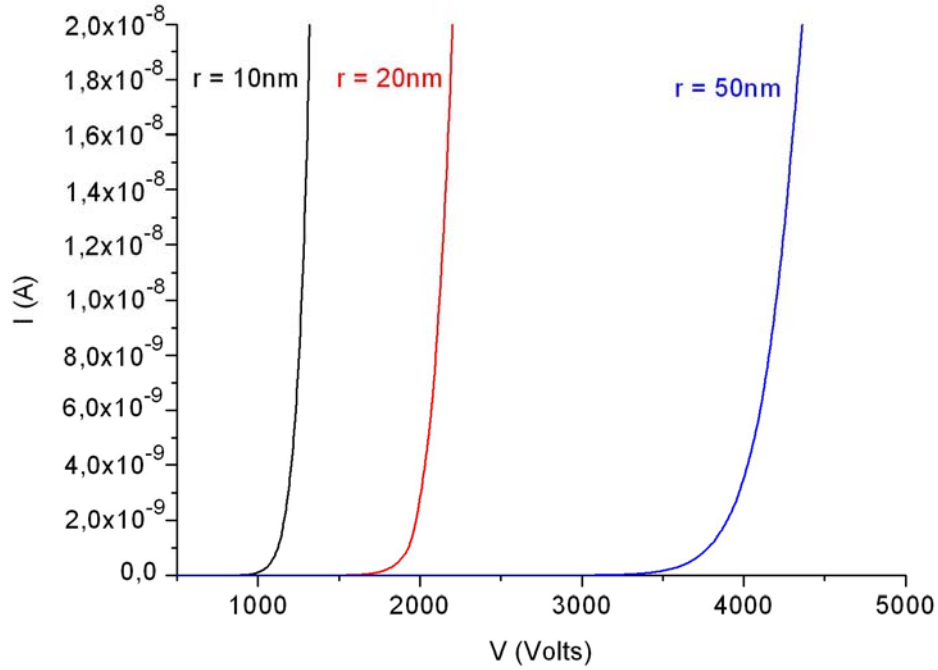


Fig. 4.2 – Curvas características $I \times V$ para as ponteiros com h de $1\mu\text{m}$, d de $30\mu\text{m}$, r de 10 nm (—), 20 nm (—) e 50 nm (—) e ϕ de 4 eV .

Através da Figura 4.2, verificamos que quanto menor o raio de curvatura da ponteira, menor é a tensão de limiar do dispositivo. Se a tensão de limiar do dispositivo for definida quando se tem uma corrente da ordem de $1 \times 10^{-9}\text{ A}$, para a ponteira com raio de curvatura de 10 nm , o valor da tensão está em torno de 1200 V . Já para as ponteiros com raio de 20 e 50 nm , o valor da tensão de limiar sobe para 1900 e 3800 V , respectivamente.

A partir das curvas características $I \times V$, plotamos o gráfico de F-N, como descrito no Capítulo 2, Item 2.1, e que é representado pela Equação (2.13)

$$\ln\left(\frac{I}{V^2}\right) = \ln A - B\left(\frac{1}{V}\right)$$

A Figura 4.3 mostra as curvas de F-N para as três ponteiros, juntamente com os dados da regressão linear.

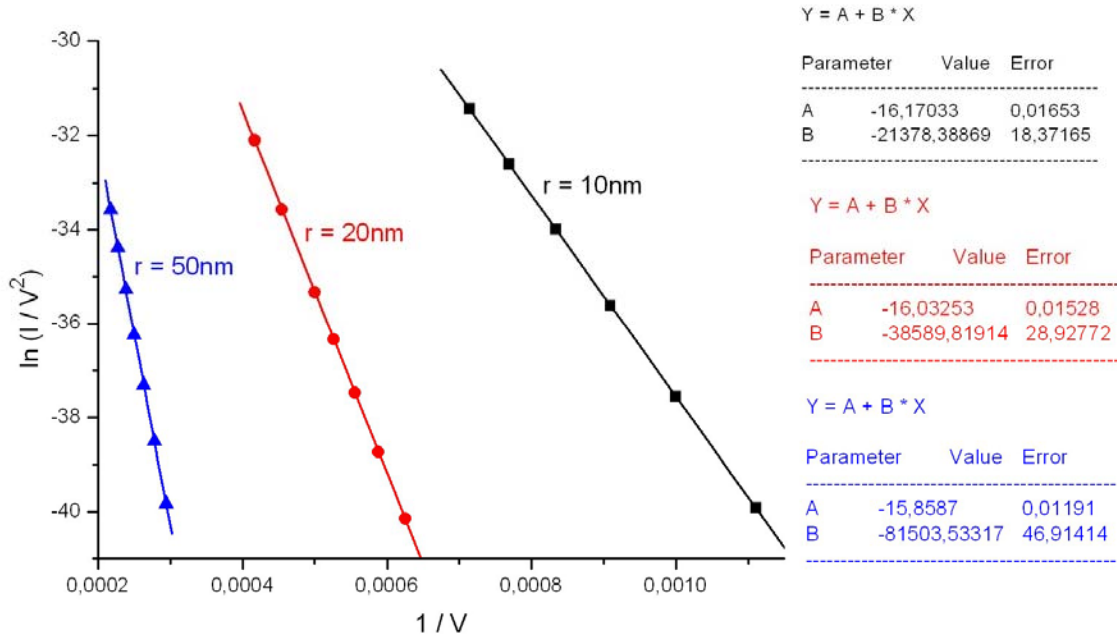


Fig. 4.3 – Gráfico de F-N com os dados da regressão linear para as pontes com h de $1\mu\text{m}$, d de $30\mu\text{m}$, r de 10 nm (—■—), 20 nm (—●—) e 50 nm (—▲—) e ϕ de 4 eV .

Através da Figura 4.3, podemos observar que os resultados obtidos das simulações obedecem ao modelo de emissão de campo por tunelamento de elétrons, considerando que cada curva corresponde a uma reta com inclinação negativa, da mesma forma que prevê o modelo.

Conforme descrito no Capítulo 2, Item 2.1, a partir do gráfico de F-N é possível estimar o fator de conversão de campo β e, em seguida, o fator de enriquecimento de campo γ . Considerando a Equação (2.10) da corrente elétrica como

$$I = A \times V^2 \exp\left(\frac{-B}{V}\right)$$

onde

$$A = \frac{1,4 \times 10^{-6} \times \alpha \times \beta^2}{\phi} \exp\left(\frac{9,87}{\phi^{1/2}}\right)$$

e

$$B = \frac{6,53 \times 10^7 \times \phi^{3/2}}{\beta},$$

conhecendo a função trabalho do material ($\phi = 4 \text{ eV}$) e que a inclinação (coeficiente angular) da reta de F-N corresponde ao termo B , podemos calcular o fator de conversão de campo local β para a ponteira com raio de curvatura de 10 nm da seguinte maneira:

$$21378,39 = \frac{6,53 \times 10^7 \times 4^{3/2}}{\beta_{r=10nm}}$$

$$\beta_{r=10nm} = 24435,89 \text{ cm}^{-1}$$

Sabendo a distância entre anodo e catodo ($d = 30 \mu\text{m}$) e com o valor do β , podemos calcular o fator de enriquecimento de campo através da Equação (2.17), como descrito no Capítulo 2, Item 2.2.

$$\gamma = \beta d$$

$$\gamma_{r=10nm} = 24435,89 \times 0,003$$

$$\gamma_{r=10nm} = 73,31$$

Aplicando-se o mesmo procedimento para as ponteiras com raios de 20 e 50 nm, chega-se a:

$$\beta_{r=20nm} = 13537,25 \text{ cm}^{-1}$$

$$\gamma_{r=20nm} = 40,61$$

e

$$\beta_{r=50nm} = 6409,54 \text{ cm}^{-1}$$

$$\gamma_{r=50nm} = 19,23$$

Sendo assim, através destes resultados, podemos concluir que, quanto maior o raio de curvatura da ponta, menor é o fator de enriquecimento de campo γ . Se compararmos o γ da ponta de 10 nm com o γ da ponta de 50 nm, notamos uma redução de 73,8 %. Estes

resultados demonstram que a intensidade do campo elétrico na superfície da ponta diminui com o aumento do raio de curvatura.

4.2 – Influência da Função Trabalho na Curva Característica Corrente x Tensão ($I \times V$)

O objetivo desta análise é verificar a influência que a função trabalho ϕ do material da ponteira exerce na relação entre a corrente de emissão I e a tensão entre anodo e catodo V (curva $I \times V$). Durante as simulações, foram consideradas distância entre anodo e catodo d de 30 μm , altura da ponteira h de 1 μm , raio de curvatura do hemisfério r de 20 nm e função trabalho ϕ do material de 3, 4 e 5 eV. A Figura 4.4 mostra as curvas características $I \times V$.

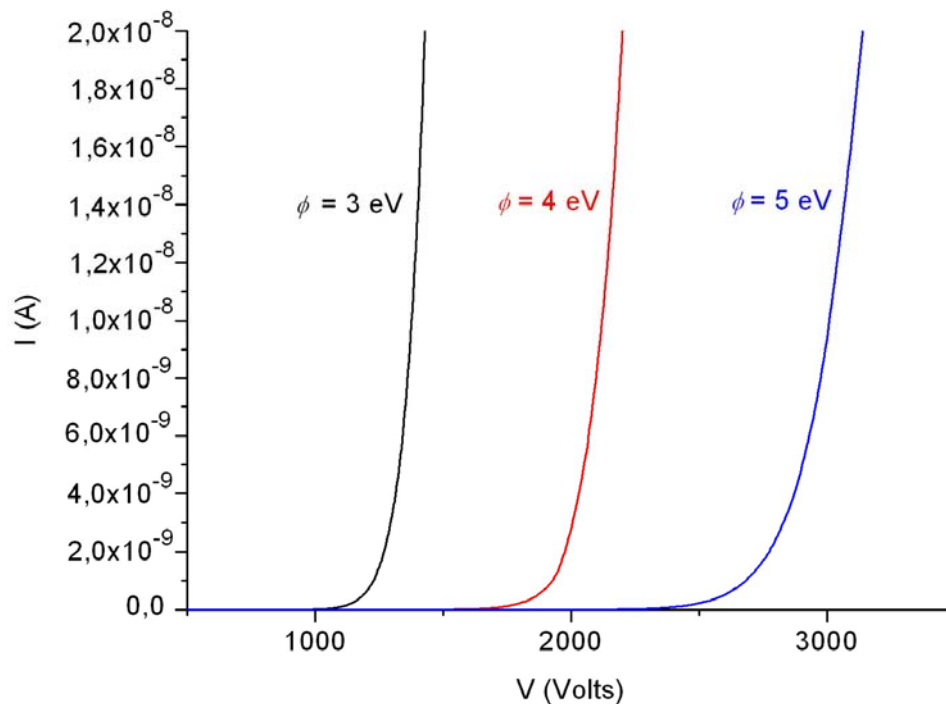


Fig. 4.4 – Curvas características $I \times V$ para as ponteiras com h de 1 μm , d de 30 μm , r de 20 nm e ϕ de 3 eV (—), 4 eV (—) e 5 eV (—).

Através das curvas da Figura 4.4, notamos que, quanto maior a função trabalho ϕ , maior é a tensão de limiar. Novamente, se definirmos a tensão de limiar do dispositivo

quando se tem uma corrente da ordem de 1×10^{-9} A, para a ponteira com função trabalho de 3 eV, o valor da tensão está em torno de 1300 V. Já as ponteiras com função trabalho de 4 e 5 eV apresentam tensão de limiar em torno de 1900 e 2700 V, respectivamente. Comparando a tensão de limiar da ponteira com função trabalho de 3 eV com a de 5 eV, nota-se um aumento de 107,7 % em seu valor.

4.3 – Dependência da Corrente de Emissão e do Campo Elétrico em Função do Raio de Curvatura da Ponteira

Para esta análise, foram consideradas distância entre anodo e catodo d de 30 μm , altura da ponteira h de 1 μm , raio de curvatura do hemisfério variando de 5 a 50 nm, tensão entre anodo e catodo V de 2000 Volts e a função trabalho ϕ do material da ponta de 4 eV. A Figura 4.5 mostra a variação da corrente de emissão I e do campo elétrico E máximo em função do raio de curvatura r .

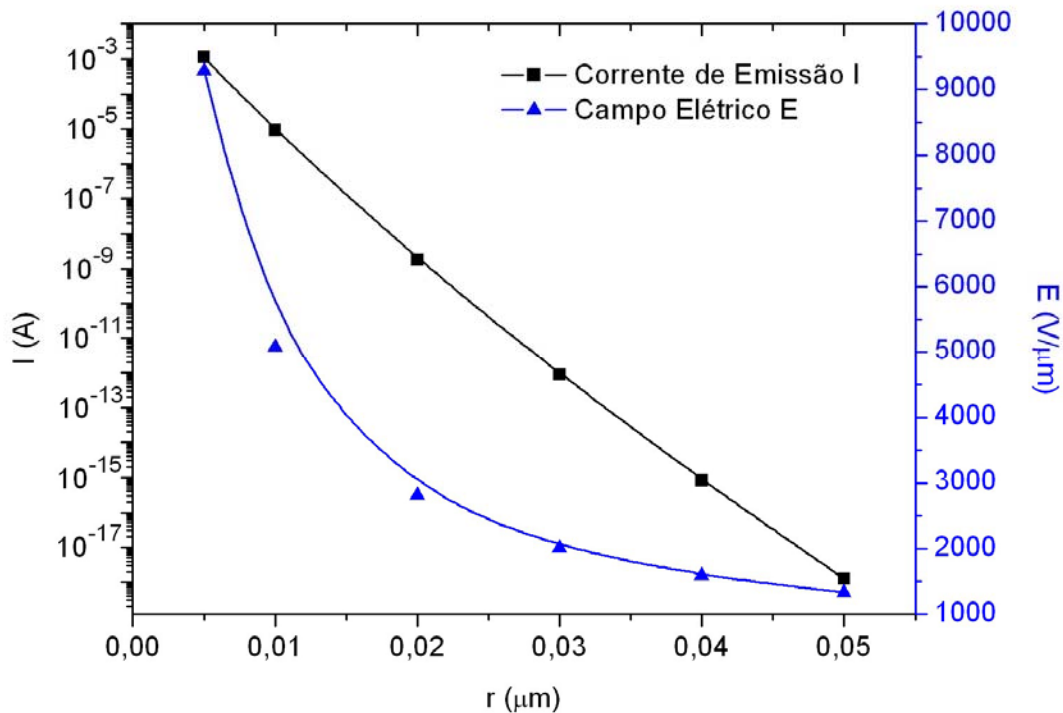



Fig. 4.5 – Variação de I (—■—) e E (—▲—) em função de r para uma ponteira com h de 1 μm , d de 30 μm , ϕ de 4 eV e V de 2000 Volts.

O raio de curvatura da ponteira é um dos fatores geométricos do dispositivo que têm uma grande importância no controle de emissão. Como pode ser visto através da Figura 4.5, quanto maior o raio de curvatura da ponteira, menor é o valor do campo elétrico na superfície, sendo que a maior variação ocorre entre os raios de curvatura de 5 a 20 nm.

Já para a corrente de emissão, a diferença apresentada em relação ao raio de curvatura é ainda maior, chegando a variações da ordem de 10^{15} , como mostra a Figura 4.5. Este comportamento é decorrente, principalmente, da presença do campo elétrico E no termo exponencial da equação da corrente, como mostrado em destaque abaixo.

$$I = \alpha \, 1,4 \times 10^{-6} \frac{E^2}{\phi} \exp \left(-6,53 \times 10^7 \frac{\phi^{3/2}}{E} \right) \exp \left(\frac{9,87}{\phi^{1/2}} \right)$$


4.4 – Dependência da Densidade de Corrente e do Campo Elétrico em Função do Ângulo do Hemisfério

Com o propósito de analisar o comportamento do campo elétrico E ao longo da superfície do hemisfério, utilizamos o software Ansys para calcular os valores do campo elétrico em função do ângulo θ do hemisfério. Em seguida, cada valor do campo elétrico foi substituído na equação da densidade de corrente J (Equação 4.1), com o objetivo de verificarmos o comportamento da densidade de corrente em função de θ .

$$J = 1,4 \times 10^{-6} \frac{E_{\theta}^2}{\phi} \exp \left(-6,53 \times 10^7 \frac{\phi^{3/2}}{E_{\theta}} \right) \exp \left(\frac{9,87}{\phi^{1/2}} \right) \quad (4.1)$$

Nesta análise, foram consideradas distância entre anodo e catodo d de 30 μm , altura da ponteira h de 1 μm , raio de curvatura do hemisfério r de 20 nm, tensão entre anodo e catodo V de 2000 Volts e função trabalho ϕ do material da ponteira de 4 eV. A Figura 4.6 mostra a variação na superfície do hemisfério da densidade de corrente normalizada (J_{θ} / J_0) e do campo elétrico normalizado (E_{θ} / E_0) em função do ângulo do hemisfério θ .

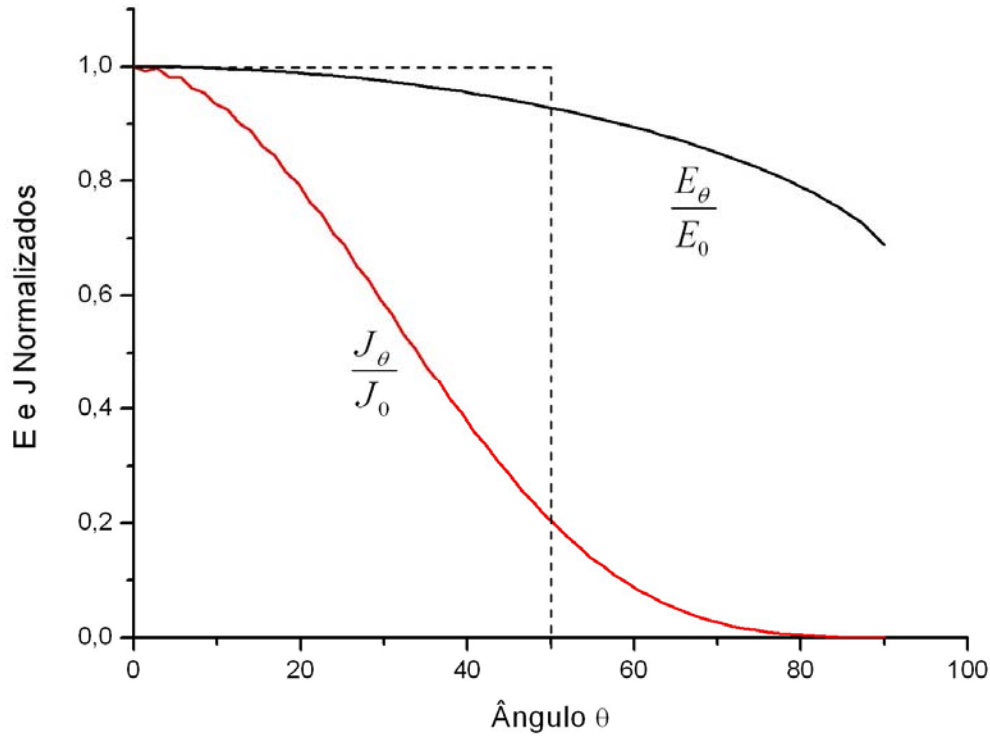


Fig. 4.6 – Variação da densidade de corrente normalizada (J_{θ}/J_0 —) e do campo elétrico normalizado (E_{θ}/E_0 —) em função do ângulo do hemisfério θ para uma ponteira com r de 20 nm, h de 1 μm , d de 30 μm , ϕ de 4 eV e $V = 2000$ Volts.

Considerando a estrutura axissimétrica, os valores do campo elétrico e da densidade de corrente para cada ângulo (E_{θ} e J_{θ}) ao longo da superfície são considerados constantes em torno do eixo de simetria. Tanto o campo elétrico como a densidade de corrente máximos (E_0 e J_0) estão localizados no ângulo 0° do hemisfério.

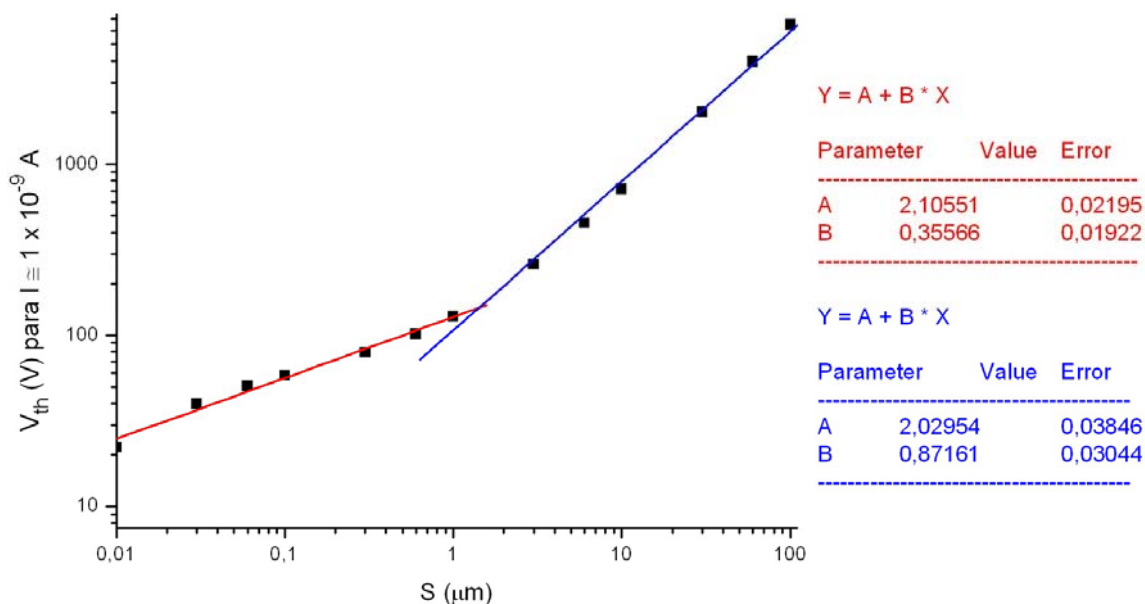
Através da Figura 4.6, podemos notar que uma pequena variação do campo elétrico na superfície da ponta pode resultar em uma variação bem maior na densidade de corrente. Se tomarmos como referência o ângulo de 50° , a intensidade do campo elétrico neste ângulo caiu 7 % em relação ao campo elétrico máximo (E_0), e a densidade de corrente caiu 80 % em relação à densidade de corrente máxima (J_0).

Também verificamos, através do programa que calcula a corrente de emissão I , que a região do hemisfério de 0 a 50° é a responsável por 87 % do total da corrente emitida pela ponteira.

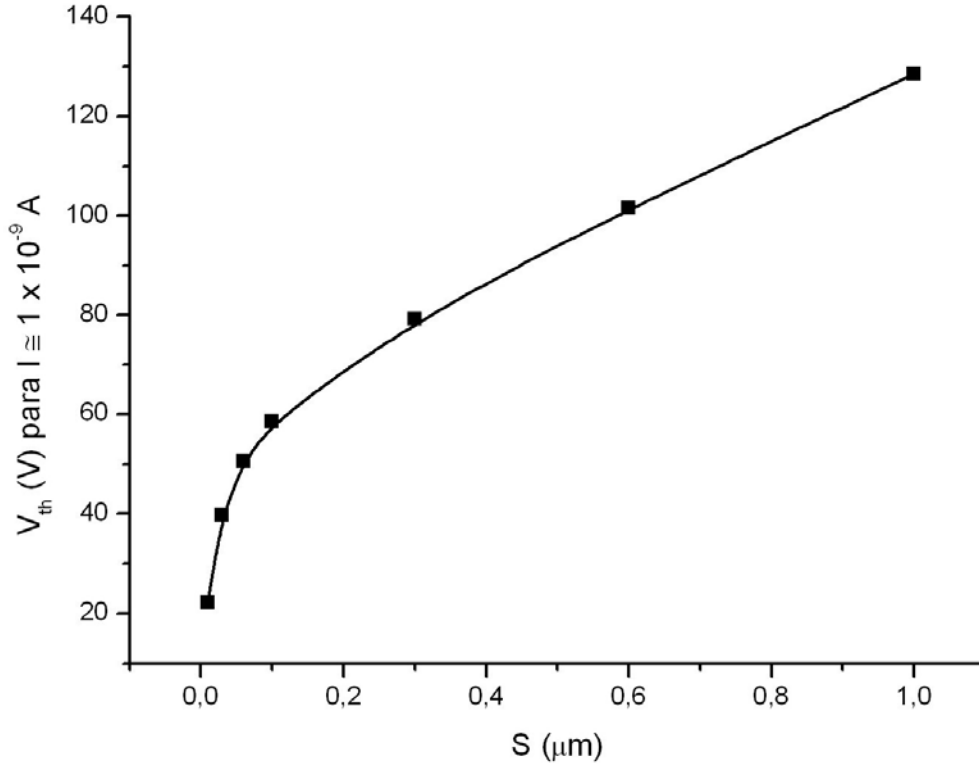
4.5 – Dependência da Tensão de Limiar em Função da Distância entre Anodo e o Topo da Ponteira

Normalmente, os valores do campo elétrico na superfície de uma ponteira necessários para iniciar o efeito de tunelamento dos elétrons estão entre $10^7 - 10^8$ V/cm, podendo resultar em uma corrente elétrica da ordem de 10^{-9} A [4,25], dependendo das características geométricas da ponteira.

Com o objetivo de analisar a influência que a distância entre o anodo e o topo da ponteira S exerce sobre o comportamento do dispositivo, foi levantado um gráfico com os valores da tensão de limiar V_{th} necessários para resultar numa corrente de emissão da ordem de 1×10^{-9} A em função da distância S . Durante esta análise, foram consideradas a altura da ponteira h de $1 \mu\text{m}$ e o raio de curvatura r de 20 nm . A partir dos resultados do campo elétrico na superfície do hemisfério (que estão associados a uma tensão V aplicada entre anodo e catodo), a corrente de emissão I foi verificada, considerando a função trabalho ϕ de 4 eV . As Figuras 4.7a e 4.7b mostram os resultados desta análise.



(a)



(b)

Fig. 4.7 – Curvas da variação de V_{th} para $I = 1 \times 10^{-9}$ A em função de S , para uma ponteira com r de 20 nm, h de 1 μm e ϕ de 4 eV. (a) (■) Escala logarítmica de V_{th} em função de S , (—) regressão linear dos dados de V_{th} para S de 0,01 a 1 μm e (—) regressão linear dos dados de V_{th} para S de 1 a 100 μm ; (b) (—■—) escala linear de V_{th} em função de S para valores de S de 0,01 a 1 μm .

Através do gráfico da Figura 4.7a e dos dados das regressões lineares, nota-se que, para valores de S entre 1 e 100 μm , maior é a dependência de V_{th} ($B \approx 0,87$). Já para valores menores de S (de 0,01 a 1 μm), quando o mesmo se aproxima do comprimento da ponteira, o dado da regressão linear ($B \approx 0,36$) mostra uma menor dependência de V_{th} para manter o valor da corrente de emissão I da ordem de 1×10^{-9} A.

Ao diminuirmos ainda mais a dimensão S , para valores próximos ao raio de curvatura da ponteira (de 0,01 até 0,1 μm), a dependência de V_{th} volta a aumentar para

manter o valor da corrente de emissão I da ordem de 1×10^{-9} A, como pode ser visto pelo comportamento da curva da Figura 4.7b.

4.6 – Fator de Enriquecimento de Campo em Função da Distância entre Anodo e Catodo

O fator de enriquecimento de campo γ , como descrito no Capítulo 2, Item 2.2, é definido na maioria das vezes como sendo a razão entre o campo elétrico na superfície E e o campo elétrico macroscópico E_M (Equação 2.16), ou

$$\gamma = \frac{E}{E_M}$$

onde

$$E_M = \frac{V}{d}$$

Quando a distância entre anodo e catodo d é considerada pequena, ou seja, quando o eletrodo do anodo se aproxima da ponta, o sistema se assemelha a uma configuração de placas paralelas. Nestas condições, o campo elétrico macroscópico pode ser definido como [42]

$$E_{M1} = \frac{V}{(d-h)} \quad (4.2)$$

e, então,

$$\gamma_1 = \frac{E}{\left(\frac{V}{d-h}\right)} \quad (4.3)$$

Em condições nas quais a distância entre anodo e catodo d é suficientemente grande, o termo h da Equação (4.3) pode ser desprezível. A Figura 4.8 mostra a variação do fator de enriquecimento de campo γ_1 em função da distância entre anodo e catodo d para uma ponteira com altura h de 1 μm e raio de curvatura r de 20 nm.

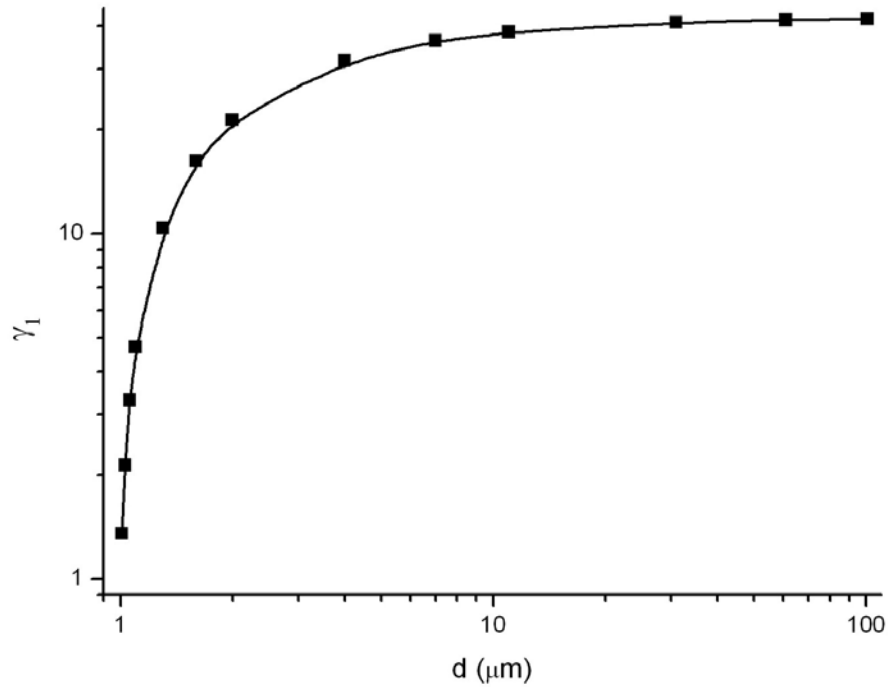


Fig. 4.8 – Curva da variação do γ_1 em função de d (—■—) para uma ponteira com h de 1 μm e r de 20 nm.

Através da Figura 4.8, percebe-se que, quando o anodo se aproxima da ponta (d próximo de h), o fator de enriquecimento de campo se aproxima de 1, o que é esperado em uma configuração de placas paralelas. À medida que a distância d vai aumentando, o γ_1 também vai aumentando até saturar. O ponto de saturação de γ_1 ocorre aproximadamente quando $d = 4 \cdot h$.

4.7 – Determinação do Fator de Enriquecimento de Campo em função da razão h/r

O objetivo desta análise é comparar os resultados de algumas expressões matemáticas que calculam o fator de enriquecimento de campo γ com os resultados das simulações. As expressões matemáticas calculam o γ baseado nas dimensões geométricas da ponteira, como a altura h e o raio de curvatura r , sem a necessidade de ter que utilizar valores do campo elétrico E , resultantes das simulações no software Ansys, como na expressão $\gamma = E / E_M$.

As expressões matemáticas utilizadas para calcular o fator de enriquecimento de campo γ em função das dimensões geométricas foram [26,27]

$$\gamma = 2 + \left(\frac{h}{r} \right) \quad (4.4)$$

$$\gamma = 0,72 \times \left(\frac{h}{r} \right) \quad (4.5)$$

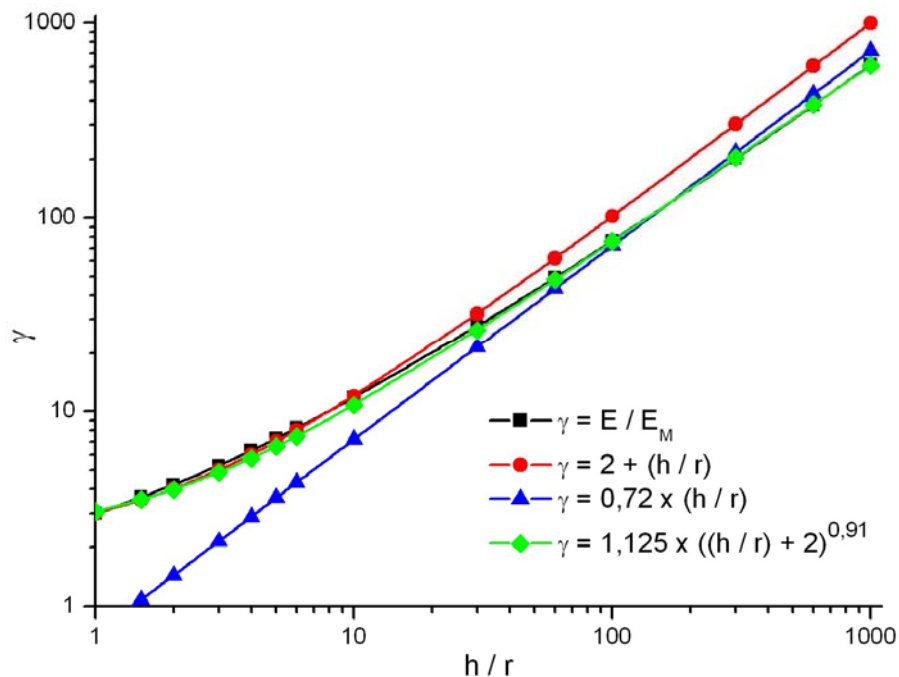
$$\gamma = 1,125 \times \left(\frac{h}{r} + 2 \right)^{0,91} \quad (4.6)$$

Para esta análise, foi estipulada distância entre anodo e catodo d de 30 μm , raio de curvatura r de 20 nm, tensão entre anodo e catodo V de 2000 Volts e altura da ponta h variando de 0,02 a 20 μm . A Tabela 4.1 mostra os resultados do fator de enriquecimento de campo γ calculados através da Equação que utiliza o campo elétrico E ($\gamma = E / E_M$) resultante das simulações, e através das Equações (4.4), (4.5) e (4.6) que utilizam as dimensões geométricas h e r . Ela também mostra o erro percentual dos resultados do γ calculados pelas Equações (4.4), (4.5) e (4.6), quando comparados com os resultados calculados pela Equação que utiliza o E .

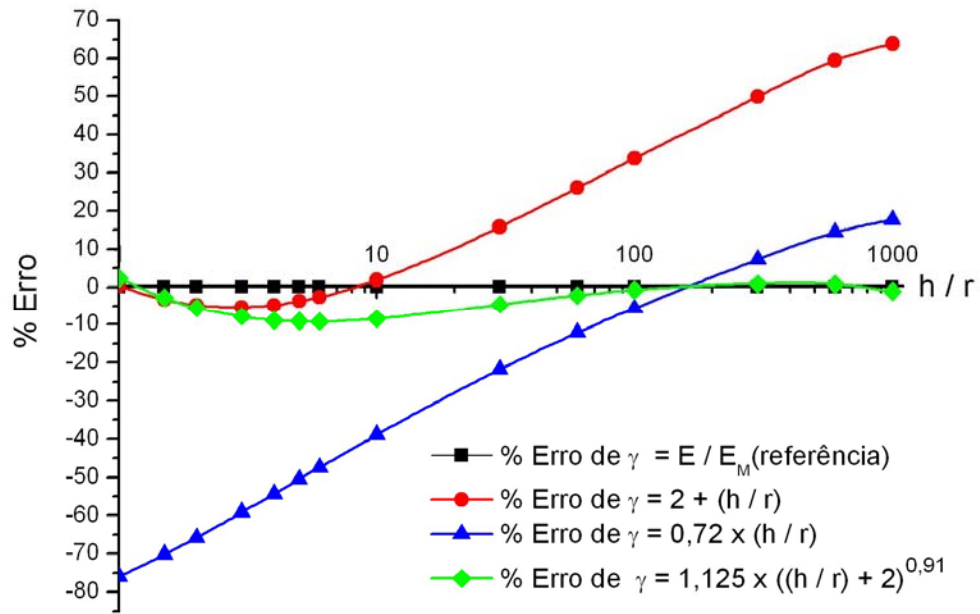
h (nm)	h/r	E (V/μm)	$\gamma = \frac{E}{E_M}$	γ Equação (4.4)	% Erro	γ Equação (4.5)	% Erro	γ Equação (4.6)	% Erro
20	1	199,64	2,99	3	0,33%	0,72	-75,92%	3,06	2,34%
30	1,5	241,24	3,62	3,5	-3,31%	1,08	-70,17%	3,52	-2,76%
40	2	279,87	4,20	4	-4,76%	1,44	-65,71%	3,97	-5,48%
60	3	351,99	5,28	5	-5,30%	2,16	-59,09%	4,87	-7,77%
80	4	419,75	6,30	6	-4,76%	2,88	-54,29%	5,74	-8,89%
100	5	484,65	7,27	7	-3,71%	3,60	-50,48%	6,61	-9,08%
120	6	547,46	8,21	8	-2,56%	4,32	-47,38%	7,46	-9,14%
200	10	785,12	11,78	12	1,87%	7,20	-38,88%	10,79	-8,40%
600	30	1841,00	27,62	32	15,86%	21,60	-21,80%	26,35	-4,60%
1200	60	3277,00	49,16	62	26,12%	43,20	-12,12%	48,11	-2,14%
2000	100	5082,00	76,23	102	33,81%	72,00	-5,55%	75,68	-0,72%
6000	300	13425,00	201,38	302	49,97%	216,00	7,26%	203,22	0,91%
12000	600	25172,00	377,58	602	59,44%	432,00	14,41%	380,70	0,83%
20000	1000	40776,00	611,64	1002	63,82%	720,00	17,72%	605,26	-1,04%

Tabela 4.1 – Resultados do γ calculados através da Equação $\gamma = E / E_M$ e através das Equações (4.4), (4.5) e (4.6), para uma ponteira com r de 20 nm, h variando de 0,02 até 20 μm, d de 30 μm e V de 2000 Volts. Os erros percentuais são dos resultados das Equações (4.4), (4.5) e (4.6) em relação aos resultados da Equação $\gamma = E / E_M$.

As Figuras 4.9a e 4.9b mostram, de maneira gráfica, os resultados do fator de enriquecimento de campo γ e dos erros percentuais, respectivamente, em função da razão h/r , apresentados na Tabela 4.1.



(a)



(b)

Fig. 4.9 – Curvas (a) dos resultados do γ e (b) dos erros percentuais, em função de h/r , para uma ponteira com r de 20 nm, h variando de 0,02 até 20 μm , d de 30 μm e V de 2000 Volts. (—■—) $\gamma = E/E_M$, (—●—) $\gamma = 2 + (h/r)$, (—▲—) $\gamma = 0,72 \times (h/r)$ e (—◆—) $\gamma = 1,125 \times ((h/r) + 2)^{0,91}$.

Através dos resultados da Tabela 4.1 e das curvas da Figura 4.9b, nota-se que, para valores de h/r de 1 até 10, a Equação (4.4) apresenta uma diferença menor do que 6%. Para valores de h/r acima de 10, os resultados passam a apresentar uma maior diferença quando comparados com os das simulações.

A Equação (4.5) foi a que apresentou a maior diferença com relação aos resultados das simulações, sendo que a diferença menor foi quando a razão h/r está entre 60 e 600, ficando abaixo de 15%.

Já a Equação (4.6), proposta por Edgcombe [27], foi a que mais se aproximou dos resultados das simulações, apresentando uma variação menor do que 10% independente da razão h/r . A precisão foi ainda maior quando a razão h/r foi entre 100 e 1000, chegando a apresentar uma diferença em torno de 1%, comparados com os resultados das simulações.

Capítulo 5

Conclusões e Perspectivas para o Futuro

5.1 - Conclusões

Ao longo deste trabalho de mestrado, foi feito um estudo do comportamento das características de emissão de campo de uma ponteira através de recursos computacionais (simulações). O modelo utilizado nas simulações foi o hemisfério sobre um poste. Este vem sendo utilizado em estudos não somente representando ponteiras de emissão de campo, mas também outros dispositivos como nanotubos de carbono e nanofios.

No Capítulo 2, foi apresentada a teoria de emissão de campo formulada por Fowler-Nordheim (F-N), que está baseada na intensidade do campo elétrico, na densidade da corrente e na função trabalho do material da ponteira.

Para obtermos os valores do campo elétrico ao longo da superfície da ponteira, escolhemos o software comercial Ansys, que utiliza o método dos elementos finitos nas análises dos fenômenos físicos. Nesta etapa do trabalho, foi estudado o método dos elementos finitos voltado às análises eletrostáticas e também os procedimentos para a realização das simulações da ponteira no software Ansys. As técnicas utilizadas para fazer o refinamento na hora de gerar a malha foram extremamente importantes para se chegar aos resultados do campo elétrico de maneira mais precisa. Também com a utilização do software Ansys, foi possível verificar a flexibilidade que apresenta o método dos elementos finitos, podendo-se facilmente alterar as características geométricas da ponteira, como raio de curvatura e altura.

Em seguida, para chegarmos aos resultados da corrente de emissão das ponteiras, foi desenvolvido um programa na linguagem Delphi. Com os resultados da intensidade do

campo elétrico ao longo do hemisfério extraído do software Ansys e conhecendo a função trabalho do material da ponteira, foi possível calcular a corrente de emissão através da integral da densidade de corrente sobre a superfície do emissor (hemisfério).

Após a conclusão das etapas para obter os resultados do campo elétrico e da corrente de emissão da ponteira, foram realizadas várias simulações com o propósito de analisar o comportamento da ponteira em função do raio de curvatura do hemisfério, da altura da ponta e da distância entre anodo e catodo. Através dos resultados destas simulações, foi possível verificar que os dados obtidos obedecem ao modelo de emissão de campo, sendo que as curvas de F-N apresentaram um comportamento linear e com inclinação negativa. Também foi possível observar a dependência do campo elétrico no cálculo da corrente de emissão, que, com uma pequena variação do campo, resultou em uma variação de várias ordens de grandezas na corrente. Este comportamento é decorrente da presença do campo elétrico no termo exponencial da equação da corrente.

5.2 – Perspectivas para o Futuro

O estudo realizado neste trabalho do comportamento da ponteira na forma de um hemisfério sobre um poste foi feito para uma única ponta. Como trabalhos futuros, sugerimos que seja feito um estudo do comportamento em um arranjo de pontas (array), com o objetivo de analisar a influência que uma ponta causa na outra em função da distância entre elas.

Outra sugestão é fazer o estudo do comportamento de ponteiros com formas geométricas parecidas com as fabricadas no laboratório, como, por exemplo, um modelo piramidal. A partir das simulações, pode-se verificar quais alterações geométricas (como ângulo de inclinação da pirâmide, altura da ponta, raio de curvatura) resultam em melhores características de emissão e, em seguida, tentar implementá-las.

Referências Bibliográficas

- [1] J. Bardeen and W. H. Brattain, The transistor, a semi-conductor triode, *Physical Review*, vol. 74 (2), pp. 230 (1948).
- [2] J. S. Kilby, Invention of the integrated circuit, *IEEE Transactions of Electron Devices*, vol. 23 (7), pp. 648 (1976).
- [3] Wei Zhu, *Vacuum Microelectronics*, John Wiley & Sons, Inc. (2001).
- [4] George Fursey, *Field Emission in Vacuum Microelectronics*, Kluwer Academic / Plenum Publishers, (2005).
- [5] A. A. Talin, K. A. Dean, J. E. Jaskie, Field emission displays: a critical review, *Solid-State Electronics*, vol. 45 (6), pp. 963 (2001).
- [6] Shigeo Itoh and Mitsura Tanaka, Current status of field-emission displays, *Proceedings of the IEEE*, vol. 90 (4), pp. 514 (2002).
- [7] K. R. Shoulders, Microelectronics Using electron-beam-activated machining techniques, *Advances in Computers*, vol. 2, pp. 135 (1961).
- [8] H. H. Busta, Review Vacuum Microelectronics – 1992, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 2, pp. 43 (1992).
- [9] C. A. Spindt, A thin film field emission cathode, *Journal of Applied Physics*, vol. 39 (7), pp. 3504 (1968).
- [10] R. N. Thomas, R. A. Wickstrom, D. K. Schroder and H. C. Nathanson, Fabrication and some applications of large-area silicon field emission arrays, *Solid-State Electronics*, vol. 17 (2), pp. 155 (1974).
- [11] H. F. Gray, G. J. Campisi and R. F. Greene, A vacuum field effect transistor using silicon field emission arrays, *Technical Digest of IEDM'86*, pp. 776 (1986).

- [12] Dorota Temple, Recent progress in field emitter array development for high performance applications, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol.24 (5), pp. 185 (1999).
- [13] Hideki Sato, Koichi Hata, Hideto Miyake, Kazumasa Hiramatsu, Yahachi Saito, Selective growth of carbon nanotubes on silicon protrusions, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol. 23(2), pp. 754 (2005).
- [14] David S. Y. Hsu, Jonathan Shaw, Integrally gated carbon nanotube-on-post field emitter arrays, *Applied Physics Letters*, vol. 80(1), pp. 118 (2002).
- [15] K. S. Yeong and J. T. L. Thonga, Field-emission properties of ultrathin 5 nm tungsten nanowire, *Journal of Applied Physics*, vol. 100, pp. 114325 (2006).
- [16] Raghunandan Seelaboyina, Jun Huang, Jucheol Park, Dong Hun Kang, Won Bong Choi, Multistage field enhancement of tungsten oxide nanowires and its field emission in various vacuum conditions, *Nanotechnology*, vol. 17 (19), pp. 4840 (2006).
- [17] Lei Zhang, Ann Q Gui and W N Carr, Lateral vacuum microelectronic logic gate design, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 1 (2), pp. 126 (1991).
- [18] D. Nicolaescu, Modeling of the field emitter triode (FET) as a displacement/pressure sensor, *Applied Surface Science*, vol. 87-88, pp. 61 (1995).
- [19] Yoshinobu Sugiyama, Recent progress on magnetic sensors with nanostructures and applications, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, vol. 13 (3), pp. 1075 (1995).
- [20] R. H. Fowler and L. Nordheim, Electron emission in intense electric fields, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, vol. 119 (781), pp. 173 (1928).
- [21] I. Brodie and P. R. Schwoebel, Vacuum Microelectronics Devices, *Proceedings of the IEEE*, vol. 82(7), pp. 1006 (1994).
- [22] R.E. Burgess, H. Kroemer, and J. M. Houston, Corrected values of Fowler-Nordheim field emission function $v(y)$ and $s(y)$, *Physical Review*, vol. 90 (4), pp. 515 (1953).
- [23] C. A. Spindt, I. Brodie, L. Humphrey and E.R. Westerberg, Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones, *Journal of Applied Physics*, vol. 47 (12), pp. 5248 (1976).

- [24] R. V. Latham, High Voltage Vacuum Insulation: The Physical Basis, Academic Press, (1981).
- [25] C. J. Edcombe and U. Valdrè, Microscopy and computational modeling to elucidate the enhancement factor for field electron emitters, *Journal of Microscopy*, vol. 203 (2), pp. 188 (2001).
- [26] R. G. Forbes, C. J. Edgcombe and U. Valdrè, Some comments on models for field enhancement, *Ultramicroscopy*, vol. 95, pp. 57 (2003).
- [27] C. J. Edgcombe and U. Valdrè, The enhancement factor and the characterization of amorphous carbon field emitters, *Solid-State Electronics*, vol. 45 (6), pp. 857 (2001).
- [28] R. G. Forbes, Low-macroscopic-field electron emission from carbon films and other electrically nanostructured heterogeneous materials: hypotheses about emission mechanism, *Solid-State Electronics*, vol. 45 (6), pp. 779 (2001).
- [29] G. C. Kokkorakis, A. Modinos and J. P. Xanthakis, Local electric field at the emitting surface of a carbon nanotube, *Journal of Applied Physics*, vol. 91 (7), pp. 4580 (2002).
- [30] T. Utsumi, Keynote Address Vacuum Microelectronics: What's New and Exciting, *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 38 (10), pp. 2276 (1991).
- [31] H. Craig Miller, Change in field intensification factor β of an electrode projection (whisker) at short gap lengths, *Journal of Applied Physics*, vol. 38 (11), pp. 4501 (1967).
- [32] Silvester P. and Chari M. K. V., Finite element solution of saturable magnetic field problems, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89 (7), pp. 1642 (1970).
- [33] João Pedro A. Bastos, Nelson Sadowski, *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*, Marcel Dekker, Inc. (2003).
- [34] Jianming Jin, *The Finite Element Method in Electromagnetics*, Wiley-IEEE Press; 2 Rev edition, (2002).
- [35] P. P. Silvester and R. L. Ferrari, *Finite Elements for Electrical Engineers*, Cambridge University Press, Second edition, (1990).

- [36] D. Hong, M. Aslam, M. Feldmann, M. Olinger, Simulations of fabricated field emitter structure, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, vol. 12 (2), pp. 764 (1994).
- [37] D. Hong, D. M. Aslam, Simulation study of microtip field emitter arrays in triode configuration, *Technical Digest of IVMC'97*, pp. 336 (1997).
- [38] A. Seidl, M. Takai, A. Hosono, S. Yura, S. Okuda, Geometry effects arising from anodization of field emitters, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, vol. 18 (2), pp. 929 (2000).
- [39] Kyung Ho Park, Soonil Lee, Ken Ha Koh, Simulation of triode-type field emitter with thin-film cathodes, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, vol. 21 (4), pp. 1680 (2003).
- [40] Sungil Bae, Woo Jong Seo, Seungho Choi, Soonil Lee, Ken Ha Koh, Double-gate field emitters with planar carbon-nanoparticle cathodes: Simulation studies, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, vol. 22 (3), pp. 1303 (2004).
- [41] Manual de Referência e Documentação do Ansys 8.1.
- [42] R. C. Smith, J. D. Carey, R. D. Forrest, S. R. P. Silva, Effect of aspect ratio and anode location on the field emission properties of a single tip based emitter, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, vol. 23 (2), pp. 632 (2005).

Trabalhos Publicados pelo Autor

1. D. F. Takeuti, M. N. Tirolli, C. L. Danieli, M. A. R. Alves, E. S. Braga, P. H. L. de Faria, Fabrication of silicon field-emission arrays using masks of amorphous hydrogenated carbon films, *Microelectronics Journal* 38 (2007) 31 - 34.
2. M. N. Tirolli, C. L. Danieli, M. A. R. Alves, E. S. Braga, D. F. Takeuti, Fabricação e Simulação de Microponteiras de Silício, XXVII Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e na Ciência - CBRAVIC, Itatiba, SP, Julho de 2006, PI-44, pp. 19/23.
3. C. L. Danieli, M. N. Tirolli, M. A. R. Alves, E. S. Braga, D. F. Takeuti, Surface Inspection of Silicon Microtip Fabrication Processes, V Encontro SBPMat, Brazilian MRS Meeting 2006, Florianópolis, SC, Outubro de 2006, M526, pp. 147.
4. M. N. Tirolli, C. L. Danieli, E. J. Carvalho, M. A. R. Alves, E. S. Braga, D. F. Takeuti, L. Cescato, Caracterização Elétrica e Simulação de Microponteiras de Silício em Arranjos de Alta Densidade, XIII InfoDisplay – VIII Seminário BrDisplay – VI Latin SID Seminar – VIII DisplayEscola, Campinas, SP, Novembro de 2006, pp. 75-78.